

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA



Facultad de Electrotecnia y Computación

Ingeniería Eléctrica

Trabajo Monográfico para optar al título de ingeniero eléctrico

**Estudio técnico de Repotenciación de la planta de
cogeneración del Ingenio Benjamín Zeledón.**

Realizado por:

Br. Alder Ernesto Chavarría Mercado 2009-29005

Tutor:

Ing. Ramiro Arcia

Fecha:

Managua, 26 de Junio 2015

Agradecimiento:

A mis padres por brindarme su apoyo, tiempo y cariño durante todo el proceso educativo, siendo mí soporte en los momentos difíciles.

Resumen:

Los ingenios azucareros de Nicaragua son agentes de mercado eléctrico, generando un excedente de 30 MW en el caso de Monte rosa y San Antonio, con excepción del Ingenio Benjamín Zeledón que es un consumidor de la red de distribución.

Este trabajo monográfico evalúa la eficiencia y capacidad de satisfacer la demanda de la planta de cogeneración del Ingenio Benjamín Zeledón, evaluando estado actual y la proyección de crecimiento con respecto al aumento de la producción de la fábrica de azúcar.

CASUR es un gran consumidor de energía a la red, por tanto existe una demanda insatisfecha de energía, por esto se procedió a evaluar el origen del problema, y la capacidad de satisfacer esta carga con la disponibilidad del bagazo de caña.

Para esto se evaluó la demanda de energía eléctrica, demanda de vapor, y la disponibilidad de bagazo de las últimas zafra y las futuras, valorando el crecimiento de la molienda y la producción de azúcar; para poder definir el tamaño ideal de la planta, considerando la eficiencia de los ciclos termodinámicos y la capacidad de la materia prima, que en este caso es el bagazo de caña.

La investigación está constituida de los siguientes capítulos:

- Demanda de energía eléctrica actual y futura.
- Consumo de vapor, y evaluación del ciclo termodinámico de generación actual.
- Disponibilidad de bagazo, y producción futura.
- Análisis de los ciclos termodinámicos.
- Propuesta de tamaño de planta a implementar.
- Evaluar excedente para venta de energía a la red de transmisión.

El ingenio Benjamín Zeledón tiene un proyecto de crecimiento de molienda para la zafra 2015-16, el cual contempla la implementación de una caldera de 250 PSI para aumentar la producción de vapor, siendo el único Ingenio que posee calderas de esta presión.

Para conocer la eficiencia y capacidad de producción de mayor rendimiento, evaluamos 3 tipos de ciclos termodinámicos con diferentes valores de presión, calculando el salto entálpico disponible y la eficiencia de cada tipo de ciclo.

Índice

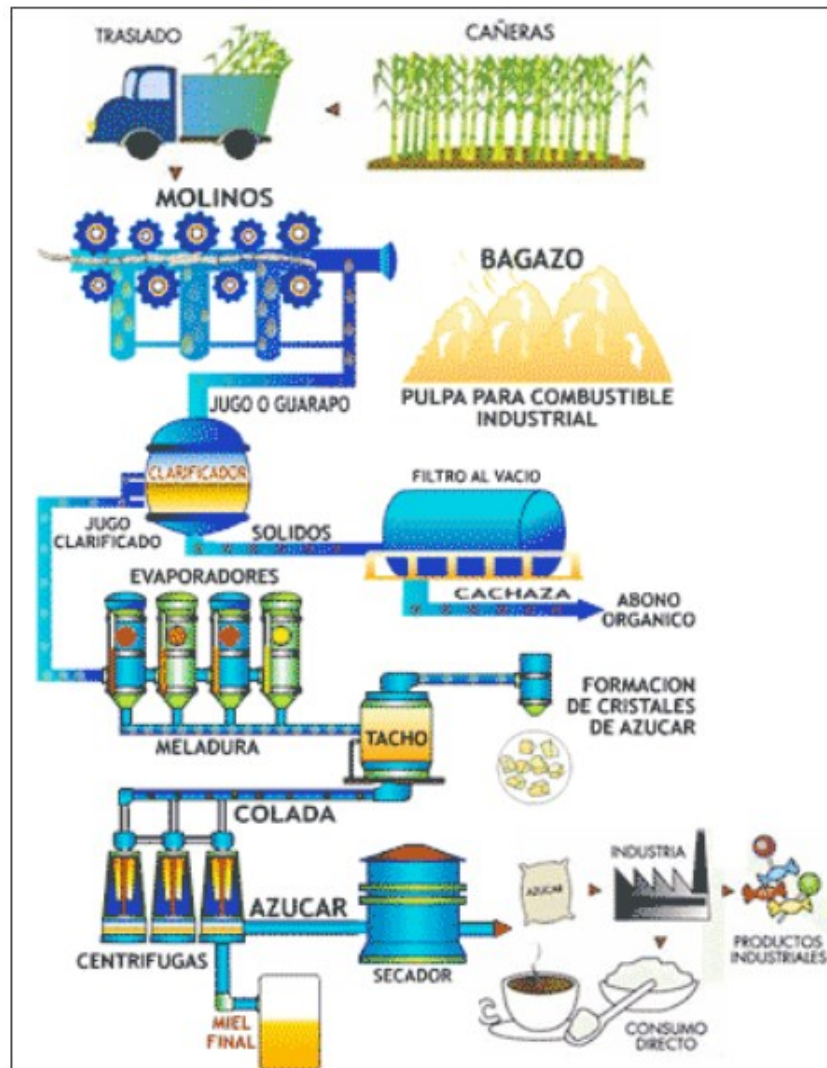
| | |
|---|----|
| 1. Introducción: | 1 |
| 2. Antecedentes: | 5 |
| 3. Justificación: | 7 |
| 4. Objetivos: | 9 |
| 4.1 Objetivo General: | 10 |
| 4.2 Objetivos Específicos: | 10 |
| 5. Marco Teórico: | 11 |
| 5.1 Ciclo de Rankine: | 12 |
| Reducir temperatura y presión de vapor de escape de la turbina: | 14 |
| Súper-calentador de vapor: | 15 |
| Influencia de presión máxima en la eficiencia: | 15 |
| 5.2 Ciclo de Rankine con recalentador: | 16 |
| 5.3 Ciclo Regenerativo: | 17 |
| Ciclo real de Rankine: | 19 |
| 6. Descripción del sistema de producción de azúcar y energía: | 20 |
| 6.1 Preparación y molienda: | 21 |
| 6.1.1 Preparación: | 21 |
| 6.1.2 Extracción de jugo: | 22 |
| 6.2 Fabricación de azúcar: | 23 |
| 6.3 Producción de Energía eléctrica: | 25 |
| 7. Análisis de demanda eléctrica: | 27 |
| 7.1 Descripción del sistema eléctrico del Ingenio Benjamín Zeledón: | 28 |
| 7.2 Medición de demanda eléctrica: | 29 |
| 7.3 Análisis de comportamiento de curvas diarias: | 38 |
| 7.4 Consumo de Energía eléctrica: | 41 |
| 7.5 Historial de generación y molienda: | 50 |
| 7.6 Proyección de crecimiento 2015-16 | 51 |
| 8. Análisis de demanda de Vapor | 54 |
| 8.1 Descripción de consumo de vapor: | 55 |
| 8.2 Demanda de vapor: | 57 |
| 8.3 Generación actual de vapor: | 58 |

| | |
|---|----|
| 8.4 Demanda futura de vapor:..... | 60 |
| 9. Disponibilidad del bagazo y poder calorífico..... | 61 |
| 9.1 Disponibilidad del bagazo: | 62 |
| 9.2 Poder Calorífico..... | 63 |
| 9.3 Rendimiento de generación de vapor..... | 64 |
| 9.4 Aumento de producción de bagazo proyectado: | 65 |
| 10. Análisis de ciclo termodinámico y tamaño de planta propuesta..... | 66 |
| 10.1 Ciclo de Rankine tradicional:..... | 67 |
| 10.1.1 Ciclo Rankine 600 PSI: | 68 |
| 10.1.2 Ciclo Rankine 900 PSI | 69 |
| 10.1.3 Ciclo Rankine 1250 PSI | 70 |
| 10.2 Ciclo de Rankine con recalentador: | 71 |
| 10.2.1 Ciclo Rankine con recalentador 600 PSI..... | 71 |
| 10.2.2Ciclo con recalentador de 900 PSI | 72 |
| 10.2.3Ciclo con recalentador de 1250 PSI | 73 |
| 10.3 Ciclo de Rankine Regenerativo: | 74 |
| 10.3.1 Ciclo regenerativo de 600 PSI | 74 |
| 10.3.2 Ciclo regenerativo 900 PSI evaluado:..... | 76 |
| 10.3.3 Ciclo regenerativo 1250 PSI evaluado:..... | 76 |
| 10.4 Tamaño propuesto de planta..... | 79 |
| 10.4.1 Características de planta Propuestas:..... | 80 |
| 10.4.2 Explotación de la planta:..... | 80 |
| 11. Potencia disponible para venta de energía..... | 81 |
| Potencia disponible para venta: | 82 |
| 12. Calculo de la VAN..... | 81 |
| Costo de inversión..... | 85 |
| Presio de energía..... | 85 |
| Costos energéticos de operación de planta..... | 85 |
| Energía disponible de venta..... | 86 |
| Estimacion de VAN..... | 86 |
| 13. Conclusiones y recomendaciones | 87 |
| Conclusiones | 88 |
| Recomendaciones:..... | 89 |
| 13. Bibliografía: | 90 |
| 14. Anexos | 91 |

1. Introducción

En Nicaragua existen cuatro ingenios productores de azúcar, pero solo San Antonio y Monte Rosa son agentes del mercado eléctrico nacional, los otros dos, Ingenio Benjamín Zeledón y Montelimar, producen energía eléctrica solo para el consumo de producción.

Centrando nuestra atención en el Ingenio Benjamín Zeledón, que según la revista del CNPA (comité nacional de productores de azúcar) produce el 9.2% de azúcar del total nacional. En el proceso de producción hay un alto consumo de energía térmica y eléctrica, en la figura 1.1 podemos observar el proceso de producción:



Tomado de la Revista del Comité Nacional de Productores de Azúcar (CNPA)

Figura 1.1 Proceso de producción de azúcar

Debido al gran consumo de vapor y electricidad, las centrales de cogeneración son indispensables en los ingenios azucareros, es decir se genera energía eléctrica y vapor para el proceso de producción. En los evaporadores la presión de trabajo es de 20 PSI, por esto se puede utilizar el vapor de salida de las turbinas, ya que no se necesita una presión tan alta, este ciclo se conoce como ciclo superior o ciclo de cabeza.

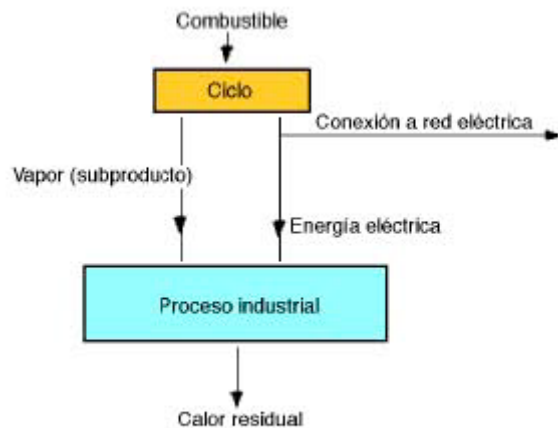


Figura 1.2 Diagrama de ciclo de cabeza de cogeneración

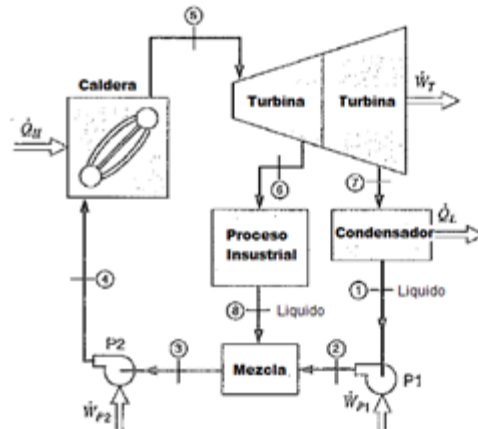


Figura 1.3 Esquema tradicional de cogeneración extraído de Fundamentos de termodinámica Van Wylen

En la figura 1.2 se observa el esquema general de una central de cogeneración; en un ingenio azucarero el combustible de la caldera es el bagazo, y el consumo térmico de la producción se centra en los evaporadores. Un evaporador tiene el objetivo de concentrar el jugo clarificado, es decir aumentar el cociente total de sacarosa, lo que se conoce como aumentar su grado Brix, esto se logra al evaporar parte del agua contenida en el jugo clarificado.

Los turbogeneradores y evaporadores son los principales consumidores de energía térmica en la mayoría de los ingenios; pero en el caso del ingenio Benjamín Zeledón, también se tiene un gran consumo en las turbinas de vapor que accionan los molinos.

En una central convencional, el vapor de escape de las turbinas es utilizado en la producción, pero en el caso a estudiar los evaporadores son alimentados directamente de las calderas pasando por válvulas de expansión y otra parte de la salida de las turbinas, esto se debe a que el flujo de vapor destinado a generación no es suficiente para satisfacer la demanda en producción,

La figura 1.3 refleja esta realidad. El ingenio tampoco es autosuficiente en consumo eléctrico, por esto una parte de la energía eléctrica se compra a la red distribuidora, lo que nos lleva a la idea principal de investigación, la repotenciación de la central de cogeneración de este Ingenio.

Aumentar la capacidad de generación de una planta o repotenciarla se puede lograr de varias formas:

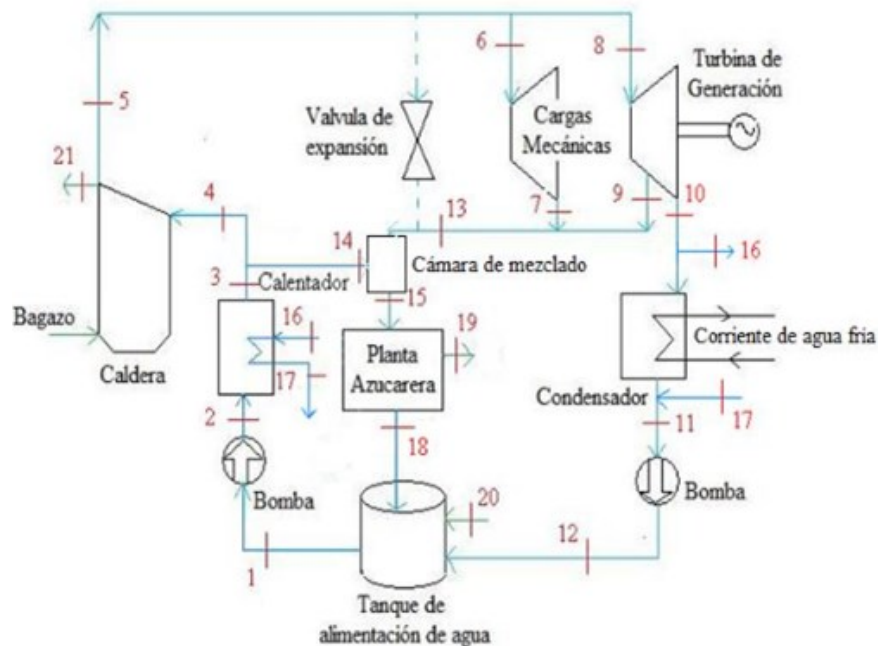


Figura 1.4 Ciclo de cogeneración del ingenio Benjamín Zeledón

- Cambiando equipos que ya no funcionan (equipos que disminuyen la capacidad de la planta).
- el reequipamiento con equipos de mayor calidad.
- repotenciar mediante cambio del ciclo termodinámico implementado. En el caso de los ingenios azucareros debido a la gran demanda de vapor y agua caliente, y el alto porcentaje de humedad en el bagazo, se implementa un ciclo de Rankine, es decir generación con turbinas de vapor y no de gases.

En el ciclo de Rankine se pueden realizar varios tipos de modificaciones, como agregar recalentadores, que tienen la función de tomar vapor de salida de turbina y recalentarlo para alimentar otra turbina de menor presión, también se le pueden agregar pre-calentadores, este es conocido como ciclo de Rankine regenerativo.

2. Antecedentes:

La implementación de centrales de cogeneración eficientes en los ingenios azucareros en Nicaragua está ligada al proceso de inserción de productores privados al sector eléctrico de Nicaragua en el año 1996. La nueva Ley de Electricidad fue aprobada en 1998, que permitió la entrada de nuevas plantas a partir de contrataciones con empresas privadas (PPA's)

Acordando la compra-venta de energía eléctrica con dos ingenios azucareros: Nicaragua Sugar Estates (ISA, S.A.), y Agroindustrial Azucarera S.A. (Timal).

En 1998 el ingenio San Antonio instaló una caldera nueva y modificó una antigua, ambas con una presión de 600 PSI, también se instaló un turbogenerador de 15.9 MW, aumentando la potencia instalada a 23.4 MW. En el año 2003 se modifica la planta de cogeneración sustituyendo un turbo antiguo de 7.5 MW por otro de 20 MW, en 2004 se instala otro turbo de 20 MW, junto a otra caldera de 600 PSI.

La última repotenciación se realizó en el año 2011, cuando se instala otro turbogenerador de 20 MW, dándole una potencia instalada de 80 MW a la planta de cogeneración, entregando 30 MW al SIN.

Monte Rosa también es agente del mercado eléctrico de Nicaragua, desde la administración del grupo Pantaleón se implementa un ciclo de cogeneración eficiente, este proyecto está compuesto de dos fases.

La primera expansión se realizó entre las zafras 2001-2002 y 2003-2004. Esta expansión incluyó la instalación de un turbogenerador de escape de 15 MW y la instalación de una caldera de alta presión. En el 2004 se instala una caldera de 900 PSI y la potencia instalada aumenta a 62.5 MW.

Uno de los ingenios que está realizando una fuerte inyección de capital es el Montelimar, propiedad del consorcio naviero Navinic, implementara una caldera de 1200 PSI para poder generar 36 MW, convirtiéndose en otro agente del mercado eléctrico y aumentando la capacidad de molienda de caña de azúcar.

3. Justificación:

La motivación para realizar un estudio de repotenciación de la planta de cogeneración de CASUR se basa en dos razones principales:

- Satisfacer la demanda de energía eléctrica y térmica total de la empresa, considerando el incremento proyectado en la carga de fábrica.
- Incrementar el rendimiento de la planta.

El ingenio Benjamín Zeledón o CASUR, durante la zafra 2013-14 tiene un promedio de molienda de 4,200 toneladas de caña en 24h, produciendo 6,900 sacos de 50 kg de azúcar diario. El consumo de energía, está dividida en dos cargas principales, que son consumo de fábrica y consumo de riego.

En fábrica se tiene un consumo de energía térmica y eléctrica, los principales consumidores térmicos son las turbinas del molino, los evaporadores y los turbogeneradores, la demanda total de vapor es de 240,000 lbs, la energía eléctrica generada es de 4.5 Mwh, destinando 3.5 Mwh a fabrica y el resto al consumo de riego.

La demanda del circuito de riego es abastecida en un 40% por compra a la empresa distribuidora de electricidad, que equivale a 800kwh, debido a que la planta de generación no tiene la capacidad de satisfacer toda la demanda.

La capacidad de molienda proyectada para la zafra 2015-16, es de 8,000 Toneladas en 24h, aumentado la potencia instalada a 11.2 Mw, este incremento de carga no podría ser abastecido con la capacidad de la planta de cogeneración actual, lo que genera la necesidad de aumentar la potencia generada.

La planta de cogeneración actual consta de 4 calderas de 250 PSI de presión y 280° C de temperatura, con un rendimiento de 1050 lbs de vapor/tonelada de bagazo, con un promedio de 220 toneladas de bagazo disponible por hora, es necesario implementar un ciclo termodinámico más eficiente, lo que involucraría:

- Calderas de alta presión y mayor rendimiento.
- Turbinas de mayor presión.

4. Objetivos:

4.1 Objetivo General:

- Realizar estudio técnico de Repotenciación de la planta de cogeneración del Ingenio Benjamín Zeledón.

4.2 Objetivos Específicos:

- Dimensionar la planta de cogeneración con capacidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica y térmica del Ingenio Benjamín Zeledón.
- Evaluar la posibilidad de convertir la planta de cogeneración del Ingenio Benjamín Zeledón en agente del mercado eléctrico nacional.
- Determinar el ciclo termodinámico más eficiente, considerando la evaluación de las ventajas técnicas de los ciclos de Rankine simples, con recalentadores y regenerativos.

5. Marco Teórico:

Repotenciar la central de cogeneración del Ingenio Benjamín Zeledón comprende un dimensionamiento adecuado, convirtiendo a la empresa en autosuficiente energéticamente, y aumenta el rendimiento de la central, volviéndola capaz de vender un excedente energético. Para analizar la eficiencia del ciclo de la planta, es necesario realizar un análisis termodinámico.

Las plantas de cogeneración tradicionales trabajan con el ciclo de Rankine, este ciclo consta de cuatro procesos estables, que se muestran en la siguiente figura 5.1:

5.1 Ciclo de Rankine:

La figura 5.1 muestra un ciclo ideal de Rankine mediante el comportamiento de temperatura – entropía (T vs S), en el que todos los procesos son reversibles.

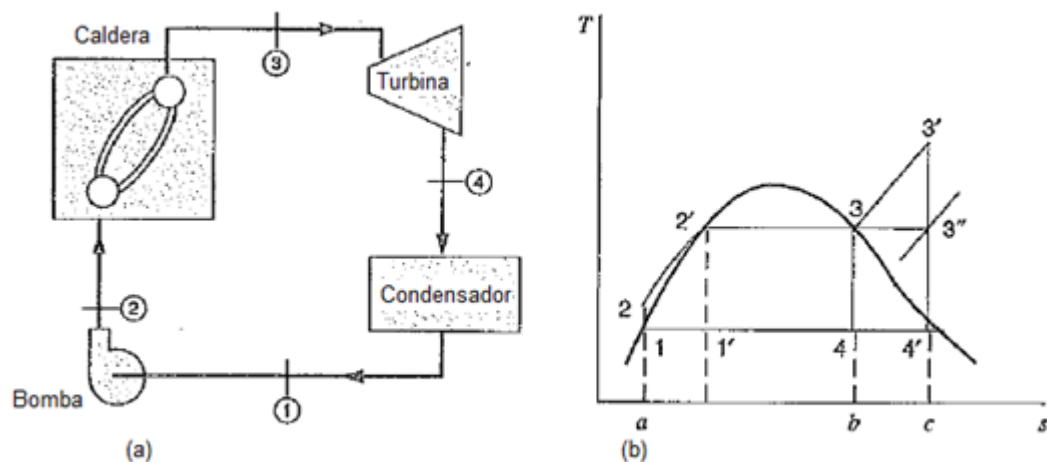


Figura 5.1 Ciclo ideal de Rankine

1-2: Proceso adiabático, se entrega trabajo al sistema para bombeo de agua hacia la caldera.

2-3: Transferencia de calor a presión constante en la caldera.

3-4: Proceso adiabático, expansión del vapor en la turbina.

4-1: Transferencia de calor al ambiente en el condensador.

Al aplicar la primera ley de la termodinámica en un volumen de control, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{c.v.} + \dot{m} \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.} \quad \text{Ecuación \#1}$$

$$q = \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}} \quad w = \frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}}$$

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e + w \quad \text{Ecuación \#2}$$

1ra Ley de la termodinámica en un V.C
Fundamentos de termodinámica Van Wylen

Los valores de energía cinética y energía potencial en los procesos del ciclo de Rankine no son tomados en cuenta, debido a que son bastante bajos, en el caso de las turbinas y bombas se consideran procesos adiabáticos debido a que la transferencia de calor al ambiente es baja.

Al aplicar la 1era ley de la termodinámica (Ecuación #2) en cada uno de los procesos, obtenemos el siguiente resultado:

Trabajo realizado por la turbina:

$$\omega_T = h_3 - h_4 \quad \text{Ecuación \# 3}$$

Calor transferido en caldera:

$$q_C = h_3 - h_2 \quad \text{Ecuación \#4}$$

Calor transferido en compresor:

$$q_L = h_4 - h_1 \quad \text{Ecuación \# 5}$$

Trabajo de bomba:

$$\omega_P = h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP \quad \text{Ecuación \#6}$$

La eficiencia térmica del ciclo será:

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_C} = \frac{\omega_T - \omega_P}{q_C} \quad \text{Ecuación \# 7}$$

Basándonos en la figura 5.1 (b), podemos calcular la eficiencia del ciclo, al dividir el área de la gráfica que está sobre la línea de temperatura del condensador (energía útil), sobre el área total (calor transferido en la caldera).

Es decir:

$$\omega_{net} = \text{área } 1 - 2 - 2' - 3 - 3' - 4' - 1 \quad \text{Ecuación \# 8}$$

Sobre el calor transferido en la caldera:

$$q_c = \text{área } a - 2 - 2' - 3 - 3' - c - a \quad \text{Ecuación \#9}$$

Reflejando el análisis descrito obtenemos:

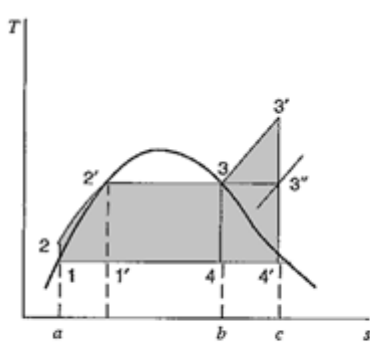


Figura 5.2 Trabajo neto de turbina

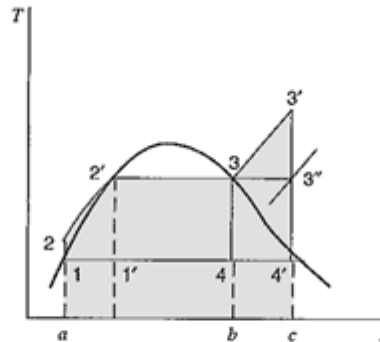


Figura 5.3 Calor transmitido en la caldera

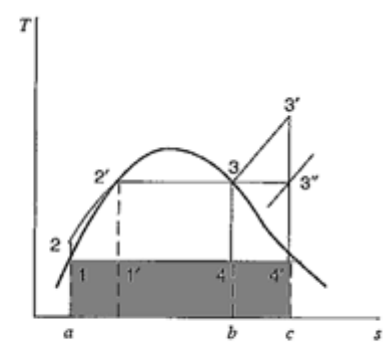


Figura 5.4 Calor liberado en el condensador

Esta gráfica nos proporciona información relevante para comprender la eficiencia del ciclo, el incremento del área de energía útil mejora la eficiencia, o bien reducir el área del calor transferido en el condensador, este efecto se logra variando los límites de temperatura y presión en el ciclo.

Reducir temperatura y presión de vapor de escape de la turbina:

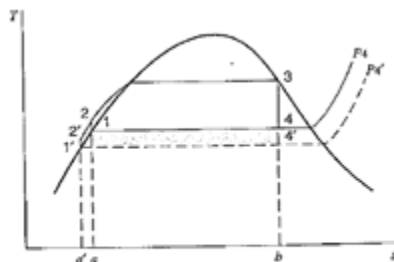


Figura 5.5 Efecto de presión en la eficiencia.

La gráfica 5.5 muestra el efecto de disminuir la presión de P_4 a P_4' , el trabajo neto aumenta, al igual que la eficiencia, pero aumenta la humedad del vapor de salida en la turbina, esto disminuye la eficiencia de la turbina y genera problemas de corrosión.

Por este problema, la salida del vapor de la turbina debe ser vapor sobrecalentado o con poca humedad.

Súper-calentador de vapor:

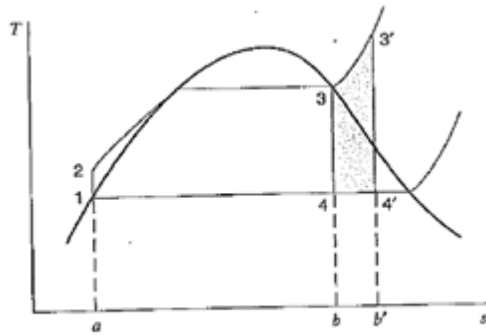


Figura 5.6 Efecto de supercalentador

El área sombreada de la gráfica 5.6 (4-3-3'-4') es el aumento de trabajo neto resultado de súper-calentar el vapor; también hay un aumento de calor transferido al sistema que es igual al área b-3-3'-b', la relación entre estas dos áreas es mayor que la relación trabajo-calor del resto del ciclo, provocando un aumento en la eficiencia.

La temperatura promedio aumenta, siendo otro indicador del incremento de la eficiencia del ciclo.

Influencia de presión máxima en la eficiencia:

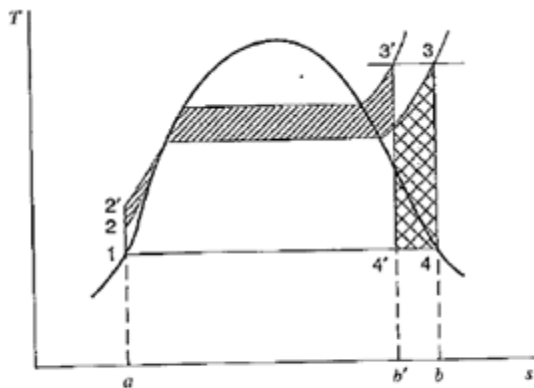


Figura 5.7 Efecto de la presión máxima en la eficiencia

Al aumentar la presión y temperatura máxima del ciclo, de una presión P_3 a una presión P_3' , el calor rechazado disminuye, esta reducción está representada por el área b'-4'-4-b-b' de la gráfica 5.7, la energía útil se mantiene constante, pero la calidad del vapor de salida disminuye.

En resumen la eficiencia de un ciclo de Rankine tradicional se puede maximizar con las siguientes condiciones:

- Baja presión de salida de turbina pero sin exceso de humedad.
- Alta presión y temperatura en transferencia de calor en la caldera.
- Súper calentar el vapor que entra a las turbina, disminuyendo los problemas de humedad.

Estas condiciones también se pueden aplicar para modificar el ciclo de Rankine tradicional, aumentando la eficiencia y el trabajo neto.

5.2 Ciclo de Rankine con recalentador:

Incrementar la presión en la transferencia de calor en la caldera aumenta la eficiencia del ciclo, pero también aumenta la humedad del vapor de baja presión de escape de la turbina. El ciclo con recalentador ha sido desarrollado para aprovechar la ventaja de un ciclo con alta presión y evita el exceso de humedad. Este ciclo se muestra en la figura 5.8 en un gráfico T-S,

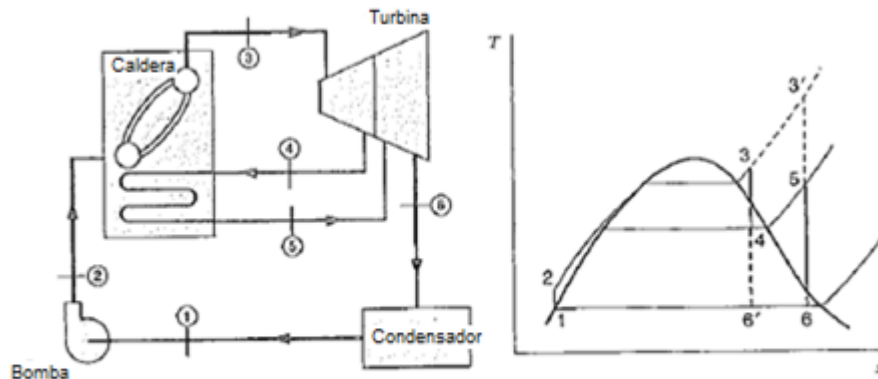


Figura 5.8 Ciclo de Rankine con recalentador

La principal característica de este ciclo, es expandir el vapor a una presión intermedia (punto 4 en la gráfica 5.8), luego se recalienta en la caldera (proceso 4-5) y se expandirá en una turbina de presión intermedia.

El trabajo neto en este tipo de ciclo será:

$$\omega_{net} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) - (h_2 - h_1) \quad \text{Ecuación \#10}$$

La transferencia de calor en la caldera será:

$$q_c = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad \text{Ecuación \#11}$$

Utilizar recalentador en el ciclo no mejora mucho la eficiencia del ciclo, la principal ventaja es disminuir la humedad del vapor de escape de la turbina, lo que reduce los problemas de corrosión en la turbina y en el circuito de vapor en general.

5.3 Ciclo Regenerativo:

Otra importante variación del ciclo de Rankine es el ciclo regenerativo, el cual utiliza pre calentadores de agua para aumentar la temperatura promedio del fluido de trabajo, de esta manera aumenta la eficiencia, en la figura 5.9 se muestra el ciclo regenerativo ideal.

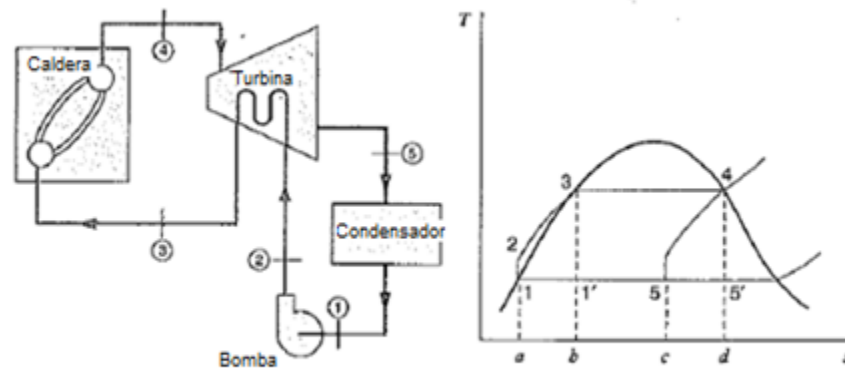


Figura 5.9 Ciclo regenerativo ideal

Durante el proceso 2-3 el fluido de trabajo es calentado en su estado líquido, y la temperatura promedio es mucho menor que durante el proceso de evaporación, reduciendo la eficiencia. Para mejorar esta condición en el ciclo regenerativo, el agua que entre a la caldera tiene una temperatura entre el punto 2 y 3, mejorando la temperatura promedio.

La figura 5.9 muestra un ciclo regenerativo ideal, el agua antes de entrar a la caldera circula por la carcasa de la turbina. La línea 4-5 muestra el estado del vapor en la turbina, en este caso además de la energía liberada por la expansión, transmite calor al agua de alimentación de caldera, variando su entropía hasta el punto 5. Este ciclo es poco práctico debido a la alta humedad del vapor de escape de la turbina y la transmisión del calor en la turbina no sería suficiente para precalentar el agua. En un ciclo práctico se extrae vapor de la turbina después de una expansión parcial del vapor como se muestra en la figura 5.10.

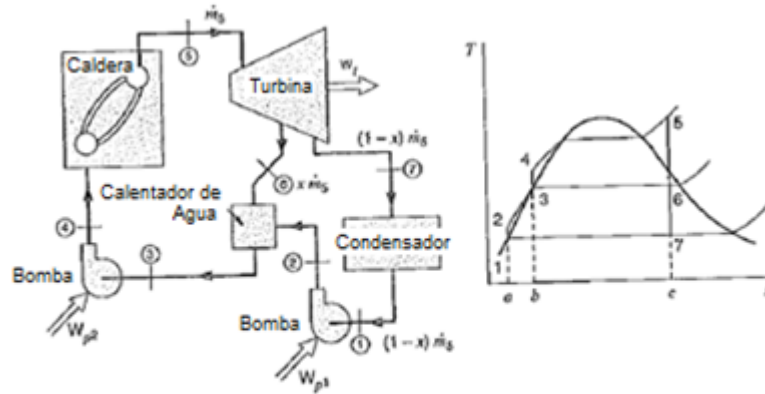


Figura 5.10 Ciclo regenerativo de Rankine

El vapor entra en la turbina en el estado 5, después parte del vapor es extraído de la turbina en el estado 6 y conducido al calentador de agua, el vapor no extraído se expande hasta llegar al estado 7. La porción vapor extraída es la suficiente para llevar al agua a condición de saturación en el estado 3, dicha porción será igual a:

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_6 = \dot{m}_3 \quad \textbf{Ecuación \# 12}$$

$$X = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} \quad (1 - X)\dot{m}_5 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_3 h_3$$

$$\text{Si } (\dot{m}_3 = \dot{m}_5)$$

$$(1 - X)\dot{m}_5 h_2 + x\dot{m}_5 h_6 = \dot{m}_5 h_3 \quad \textbf{Ecuación \#13}$$

$X = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2}$; Esta es la extracción máxima de vapor, para llevar el agua al estado 3.

El trabajo de la turbina será:

$$\omega_T = (h_5 - h_6) + (1 - X)(h_6 - h_7) \quad \textbf{Ecuación \#14}$$

El trabajo neto será:

$$\omega_{net} = \omega_T - (1 - X)(h_2 - h_1) - (h_4 - h_3) \quad \textbf{Ecuación \# 15}$$

Transferencia de calor:

$$q_c = h_5 - h_4 \quad \textbf{Ecuación \#16}$$

Ciclo real de Rankine:

Un ciclo ideal de Rankine es un ciclo reversible, es decir un sistema donde se puede revertir el proceso térmico sin dejar cambios en el sistema o entorno esto se representa con una entropía constante en una turbina o en una bomba; pero en un ciclo real esto no es posible, por esto se les llama ciclos irreversible y existe entropía generada.

Entropía en un ciclo ideal:

En una caldera y un condensador al agregar calor se da una variación de entropía, pero en la turbina se considera un proceso adiabático, y no existe transmisión de calor al ambiente por esto se considera una entropía constante, y se aprovecha el salto entálpico en la expansión del vapor para generar energía mecánica en la turbina.

Entropía en un ciclo real:

La entropía en un ciclo real no permanece constante, existen un leve crecimiento cuando el vapor se introduce en la turbina, este efecto se le conoce como generación de entropía. El salto entálpico de un ciclo real es menor en comparación de un ciclo ideal.

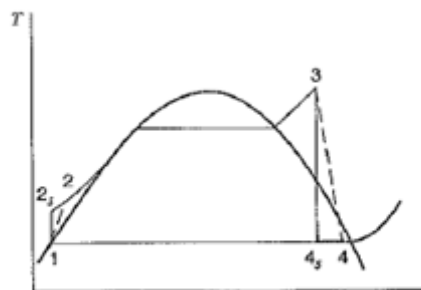


Figura 5.11 Ciclo real de Rankine

La figura 5.11 muestra el crecimiento de entropía que ocurre en un ciclo real, el estado 4 es el valor de entropía del vapor de escape, y el estado 4s es el valor de entropía en un ciclo ideal.

La eficiencia de una turbina es igual a:

$$\eta = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad \text{Ecuación \#17}$$

6. Descripción del sistema de producción de azúcar y energía:

El proceso de producción de azúcar del Ingenio Benjamín Zeledón consta de las siguientes fases:

- Siembra y cosecha de caña de azúcar.
- Transporte de caña.
- Preparación y molienda (Extracción).
- Tratamiento de jugo, centrifugado y cristalización (Fabricación de azúcar).

Siendo las actividades de extracción y Fabricación los principales consumidores de energía eléctrica y térmica; en las actividades de campos también existe demanda de energía por parte de la carga de riego y talleres automotrices.

Por esta alta demanda de energía el ingenio utiliza planta de generación térmica, para el consumo de vapor del proceso de fabricación y para generación eléctrica; siendo esta etapa parte del sistema de producción de azúcar.

6.1 Preparación y molienda:

Esta fase tiene como objetivo extraer el jugo de la caña. Se agrega agua caliente para extraer el máximo de sacarosa que contiene el material fibroso.

Consta de dos procesos principales, la preparación de la caña y la extracción del jugo.

6.1.1 Preparación:

La preparación permite mejorar la uniformidad de la alimentación de los molinos, asegurando un aumento de la capacidad del molino y en la extracción de la sacarosa, y reduciendo por otro lado, la pérdida de sacarosa en el bagazo.

La preparación de la caña en el ingenio inicia con el proceso de lavado para disminuir la cantidad de tierra y de arena en las mesas alimentadoras de caña, estas mesas dirige la caña hasta el conductor, al poseer volumen variable atraviesa 2 rodos niveladores instalados previos a la alimentación de la picadora.

Las cuchillas rompen la estructura de la caña para luego enviarla mediante un conductor hacia la desfibradora, esta desgarrar los pedazos y los convierten tiras, en el proceso de preparación no se extrae jugo de la caña.

6.1.2 Extracción de jugo:

El método de extracción implementado en el ingenio es difusión, existe un difusor longitudinal con capacidad de procesar 200 Toneladas de caña por hora, el cual consta de 9 colochos, 2 bombas de alimentación de agua, 2 de bombeo de jugo, y un tamiz de movimiento principal. La figura 6.1 muestra el funcionamiento del difusor instalado en el ingenio.

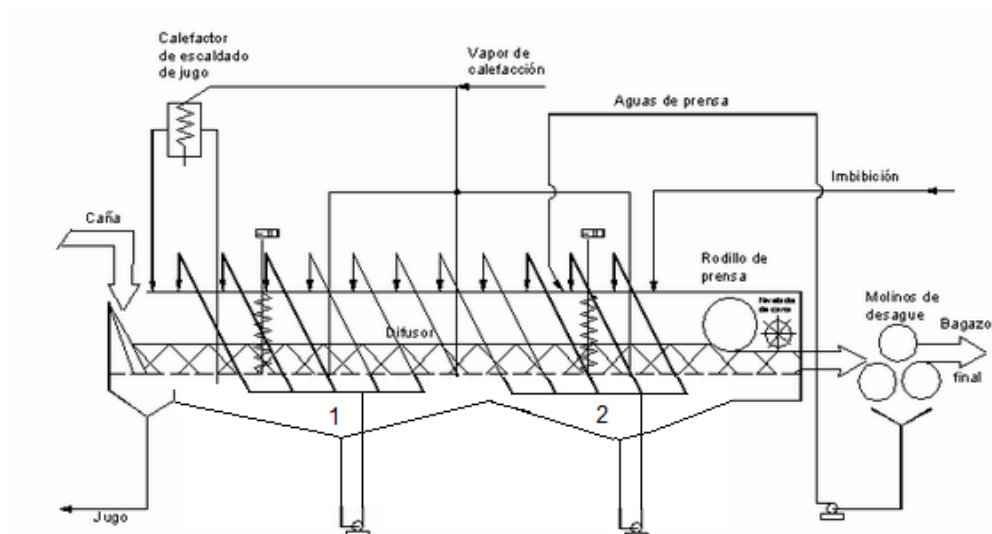


Figura 6.1

Los transportadores entregan la caña preparada o el bagazo con un 91 al 94% de las células abiertas al alimentador del difusor. Puertas deslizantes ajustables colocadas en la parte inferior del transportador alimentador distribuyen uniformemente la caña preparada o el bagazo a través del ancho del difusor.

En el difusor, la caña o bagazo que entra se calienta con jugo de circulación caliente que tiene una temperatura de 84 a 90° . Esto hace que la temperatura en la cama de bagazo se incremente inmediatamente a 75°C , que es la temperatura requerida en el proceso de extracción.

Esto hace posible que las paredes de las celdas sean permeables y que las moléculas de sacarosa se disuelvan en el jugo. Así aun aquellas celdas que no se abrieron mecánicamente por las cuchillas picadoras y por las desfibradoras toman parte en el proceso de extracción. El proceso de extracción es una combinación de genuina difusión y lavado. Este proceso se muestra en la figura 6.2.

Luego se transporta el bagazo húmedo hacia un molino, extrayendo así la mayor parte de la humedad, y la última extracción de jugo, llamada agua de prensa.

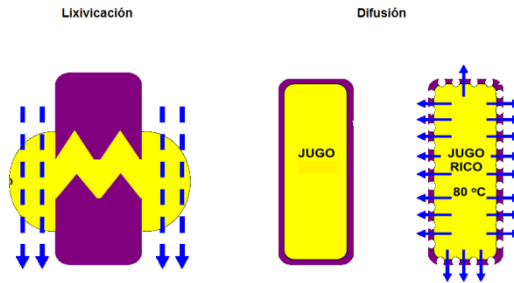


Figura 6.2

6.2 Fabricación de azúcar:

Una vez extraído el jugo de la caña, se procede a ejecutar los siguientes procesos:

- Clarificación
- Evaporación
- Cristalización
- Separación
- Secado

La planta actual tiene capacidad de procesar 6,500 sacos de azúcar diarios, la demanda de energía es bastante estable, puesto que no existen centrífugas discontinuas, haciendo que la alimentación de material sea continuo.

Clarificación:

El jugo proveniente de los molinos pasa por calentadores, que llegan a temperaturas entre 140 y 155 °F. Luego pasa por la torre de sulfatación, bajando el PH para producir azúcar blanco únicamente.

En esta etapa se utiliza azufre como agente decolorante; luego mediante la edición de la bachada de cal entre 6 y 10 baume se neutraliza el jugo. El calentamiento del jugo se realiza en tres etapas; la primera por vapor vegetal de 5.0 psi alcanzando temperaturas entre 175 y 185 °F; la segunda por vapor de 5.0 psi alcanzando temperaturas entre 205 y 215 °F y la última con vapor de 10 psi para rectificación del jugo en forma automática.

Con el proceso anterior se logra que el jugo, al ser liberado a presión atmosférica, sufra una pequeña evaporación en el tanque flash evitando que los flóculos floten o decanten con lentitud por la presencia de burbujas atrapadas en el interior.

El siguiente paso es alimentar el jugo a los clarificadores a baja velocidad para permitir la concentración de lodos y que pueden ser extraídos por gravedad en

un clarificador SRI y con bombas en los Rapi Door 444. En la etapa final de este proceso se utilizan coladores vibratorios con malla 110 mesh para la eliminación de bagacillo y evitar que llegue al producto final.

Los filtros de cabeza son parte indispensable del proceso, pues sin ellos, la pérdida de sacarosa en la cachaza sería significativa.

Evaporación:

La operación del sistema de evaporación en la planta es de quíntuple efecto, tanto para la línea de blanco como para la línea de crudo. La operación es relativamente sencilla debido a que se fijan las condiciones de entrada, salida, nivel de cada evaporador y extracción de vapores vegetales hacia el exterior.

La evaporación se realiza en evaporadores tipo Roberts en los cuales el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas que fluyen en el mismo sentido. El jugo pasa de un evaporador a otro con bombas denominadas “de transferencia”.

Cristalización

La cristalización o crecimiento de la sacarosa que contiene el jarabe se lleva a cabo en tachos al vacío. Estos cocimientos, según su pureza producirán azúcar crudo y azúcar blanco. Este es un proceso demorado que industrialmente se acelera introduciendo al tacho unos granos microscópicos de azúcar, denominados semillas. La experiencia del operativo debe juzgar el punto exacto del cocimiento, para la obtención de un buen producto.

Separación

Los cristales del azúcar se separan de la miel restante en la centrifugas, equipos cilíndricos que giran a gran velocidad. La miel pasa a través de las telas, los cristales quedan atrapados dentro de las centrifugas y luego se lavan con agua. Las mieles vuelven a los tachos o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol en las destilerías. El azúcar pasa al proceso de secado y enfriado.

Secado

En el proceso de centrifugado se utiliza agua de condensado para lavar el azúcar, lo cual da como resultado humedades entre 0.3 % y 0.6%, por lo que es necesario pasarla por un proceso de secado para alcanzar niveles entre 0.2% para azúcar crudo y 0.03% para azúcares blancos.

6.3 Producción de Energía eléctrica:

Para satisfacer la demanda energética existe una planta térmica, la cual consta de 4 calderas que trabajan a una presión de 250 PSI y 280°C, encargadas de generar suficiente vapor para alimentar las turbinas de extracción y los turbogeneradores.

La planta consta de 4 generadores con potencia instalada de 7MW, pero solo dispone de 5.5 MW, puesto que uno de las unidades generadoras esta averiada.

Las calderas son alimentadas con bagazo proveniente de mesa alimentadora; la mesa alimentadora es alimentada por conductor proveniente de la molienda.

El volumen de bagazo es nivelado antes de entrar a la caldera, el sobrante es almacenado en el patio de la planta, este será utilizado cuando falte la alimentación continua de los conductores.

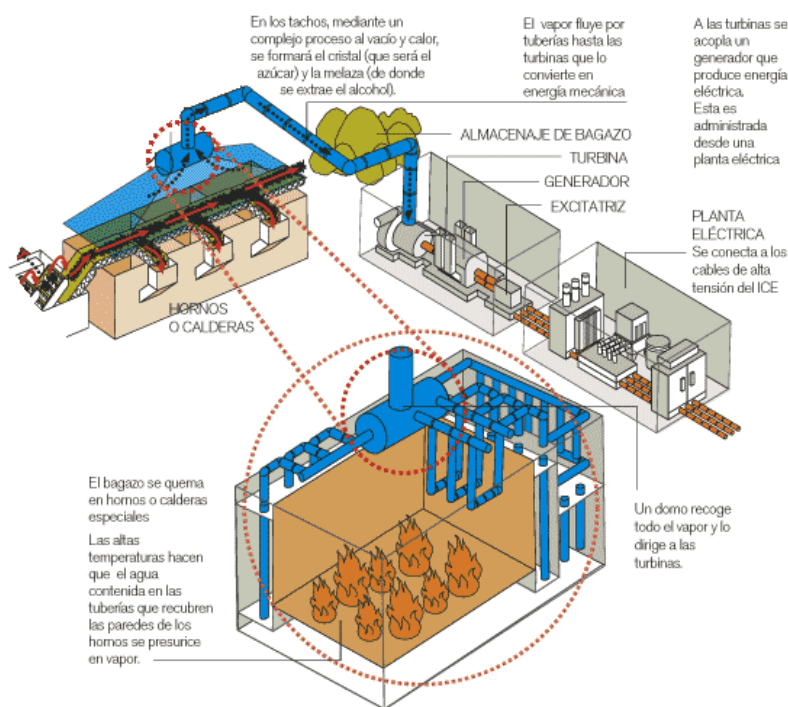


Figura 6.3

La figura muestra el proceso de generación descrito de energía eléctrica, la salida de vapor de las turbinas es de 20 PSI, este es destinado a la alimentación de los evaporadores y otros consumos de vapor.

Una parte de la salida de vapor de las calderas está dirigida al accionamiento de las turbinas y otra a una válvula de expansión que alimenta a los evaporadores,

puesto que la demanda de vapor de fabricación no se satisface totalmente con la salida de las turbinas.

Proyección de crecimiento de producción zafra 2015-16

Para la zafra 15-16 se cambiara el proceso de molienda, y se aumentará la capacidad de producción de azúcar, con el objetivo de procesar 2,000,000 de quítales de azúcar, además se estima un incremento de 7,000 toneladas de cañas molidas diarias.

El mayor porcentaje del crecimiento de la demanda energética será causado por el cambio de molienda, puesto que la picadora o cuchilla, y la desfibradora de caña serán accionadas por motores eléctricos; y el método de molienda cambiará a 5 molinos en serie.

Se estima un crecimiento de 11.263 MW de potencia instalada, esta demanda energética debe ser asumida por una planta de mayor capacidad.

7. Análisis de demanda eléctrica

7.1 Descripción del sistema eléctrico del Ingenio Benjamín Zeledón

Basados en el diagrama unifilar proporcionado por jefatura eléctrica de la empresa, el circuito del ingenio está conectado a la red de distribución por circuito de alimentación de 24.9 KV.

La barra principal del sistema trabaja con tensión de 0.48KV; de este nodo se derivan los siguientes circuitos de consumo propio, el circuito de riego, la barra de mantenimiento, talleres mecánicos automotrices, y el consumo de oficinas.

Se considera consumo de fábrica las subdivisiones de consumo propio, barra de mantenimiento, y el consumo de fabricación (centrífugas, clarificación de jugo, cristalización, etc); dichos circuitos garantizan alimentación de los equipos de calderas, generación, molienda, y proceso de fabricación de azúcar.

Los talleres automotrices, gasolinera, y almacenes, son considerados consumo de actividades agrícolas, a excepción del circuito de riego que es estimado en demanda de siembra y riego; ambos son facturados a gerencia de campo.

En la figura 7.1 podemos observar la división de la carga en el sistema del ingenio, se puede observar que la potencia eléctrica instalada es de 7 MW, pero solo dos unidades están trabajando, puesto que la demanda de vapor no se satisface con las calderas existentes.

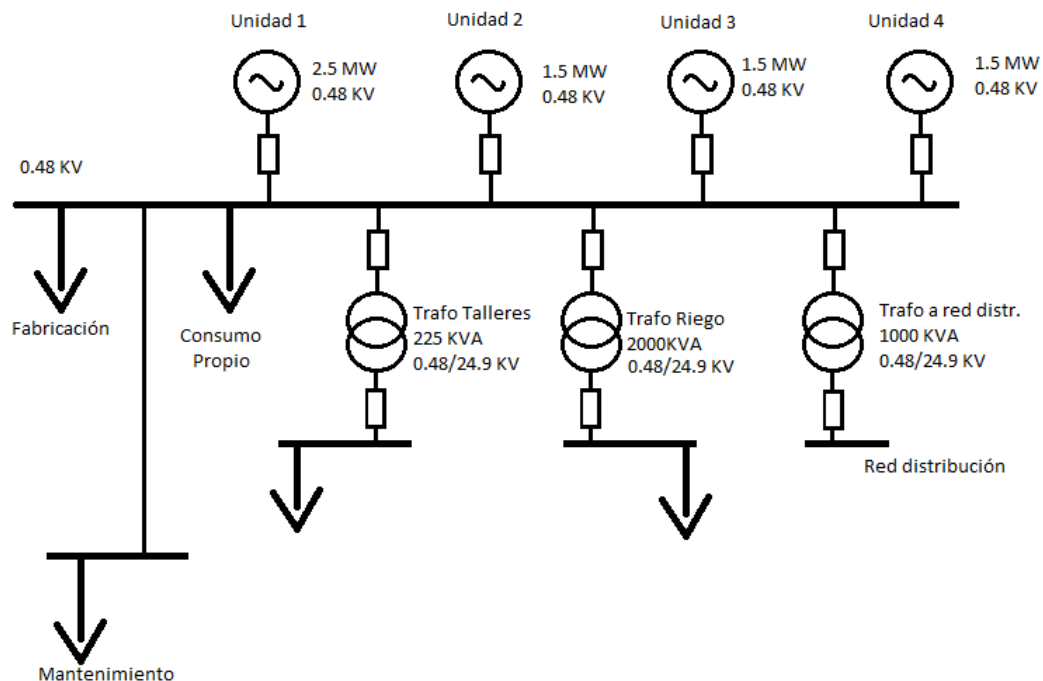


Figura 7.1

7.2 Medición de demanda eléctrica:

Para poder medir las principales cargas del sistema eléctrico del ingenio, se definió puntos claves de medición, para conocer la generación total, el consumo de fábrica, circuito de riego, y demanda de talleres.

Puntos de medición:

Se realizó medición de características eléctricas en unidades generadoras #1 y #4, puesto que eran los únicos turbogeneradores trabajando, la unidad 3 presenta fallas en generador; la unidad 2 alterna trabajo con unidad 4 y es equipo de reserva de planta de generación,.

Se realizó medición en celdas de circuitos de riego y transformador de talleres, en el caso de medición de consumo de la red se registró medición de energía de cada hora.

En la figura 7.2, se muestran los puntos de medición mencionados en los párrafos anteriores:

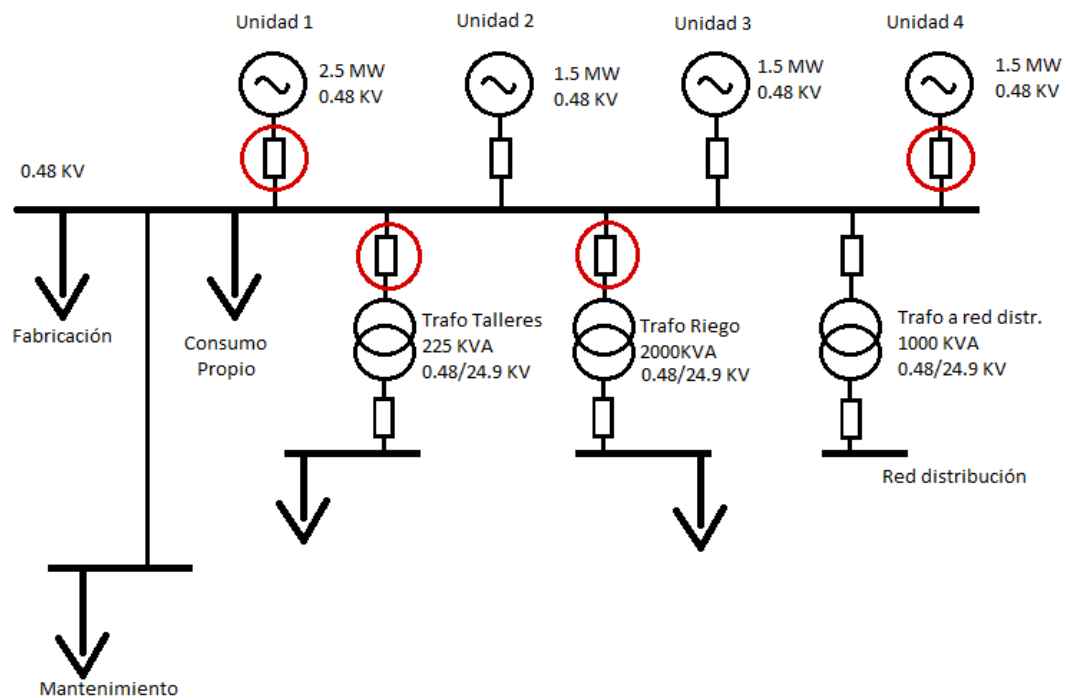


Figura 7.2

La demanda de fábrica, se estimó de la siguiente manera:

$$\text{Demanda de fábrica} = (\text{Generación total}) + \text{Consumo a red} - (\text{Demanda de riego}) - (\text{Demanda de talleres automotrices}).$$

Características de la medición

Las características eléctricas consideradas en la medición fueron:

- Voltaje
- Corriente
- Factor de potencia
- Potencia Activa
- Potencia Aparente

Se utilizó analizador de calidad de energía para realizar dichas mediciones, este equipo cuenta con modo registrador para realizar mediciones de potencia, donde se puede almacenar los valores antes mencionados.

El período de medición se definió para registrar 24 horas, debido al tamaño de la memoria interna del equipo que es de 18 MB se ajustó registro de medición en cada 5 segundos; el equipo registra el valor mínimo, medio, y máximo de cada característica eléctrica considerada en los 5 segundos, generando de esta manera un total de 17280 muestras por cada medición equivalentes a 17.3 MB.

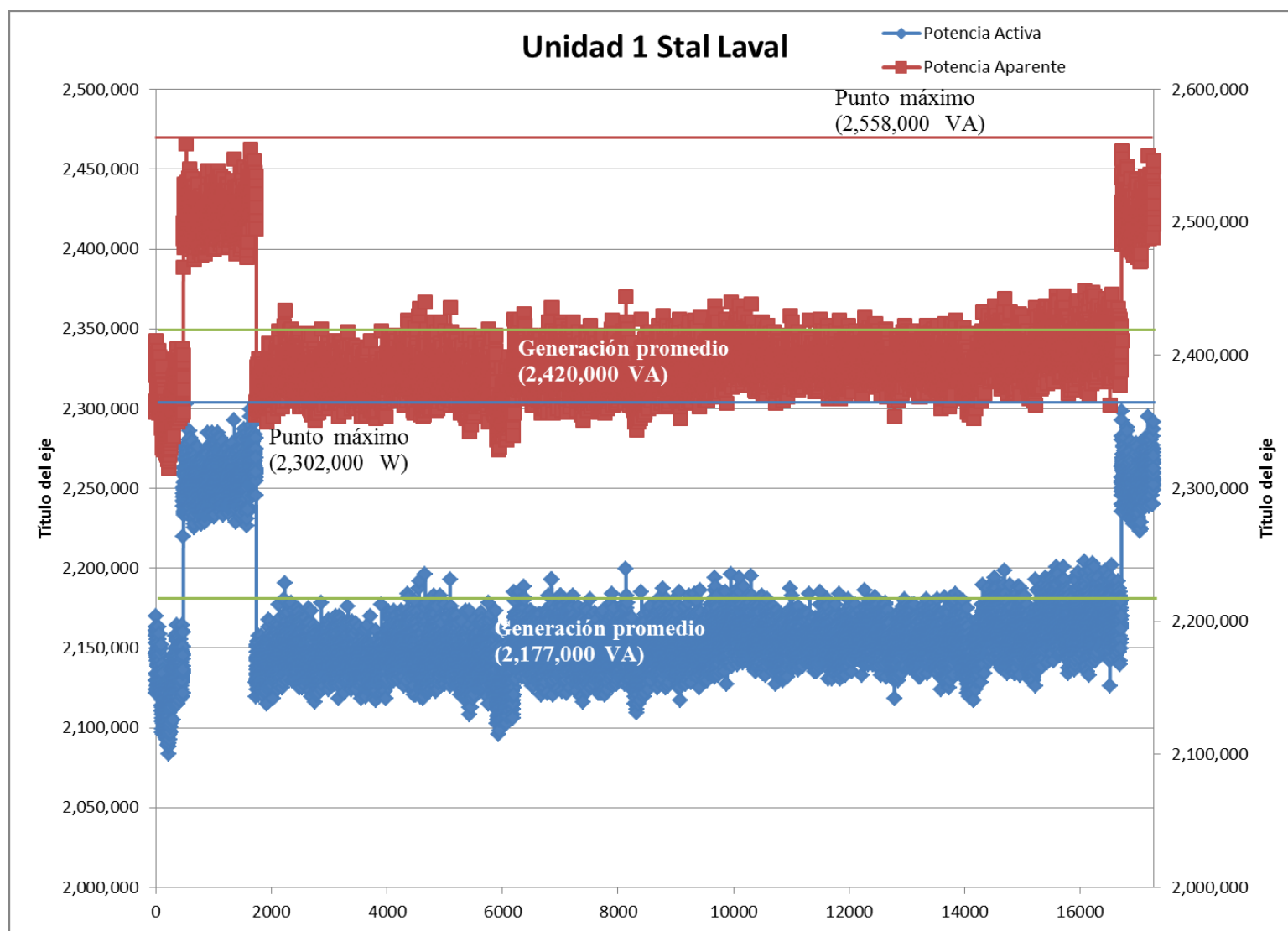
Los valores reflejados en las gráficas de demanda diaria son los puntos máximos de cada registro, siendo 17280 puntos máximos de potencia. El eje vertical primario (izquierdo) muestra los rangos de potencia activa en W, el eje vertical secundario (derecho) los valores de potencia aparente en VA.

El suministro de potencia es dependiente de la alimentación de vapor hacia la turbina.

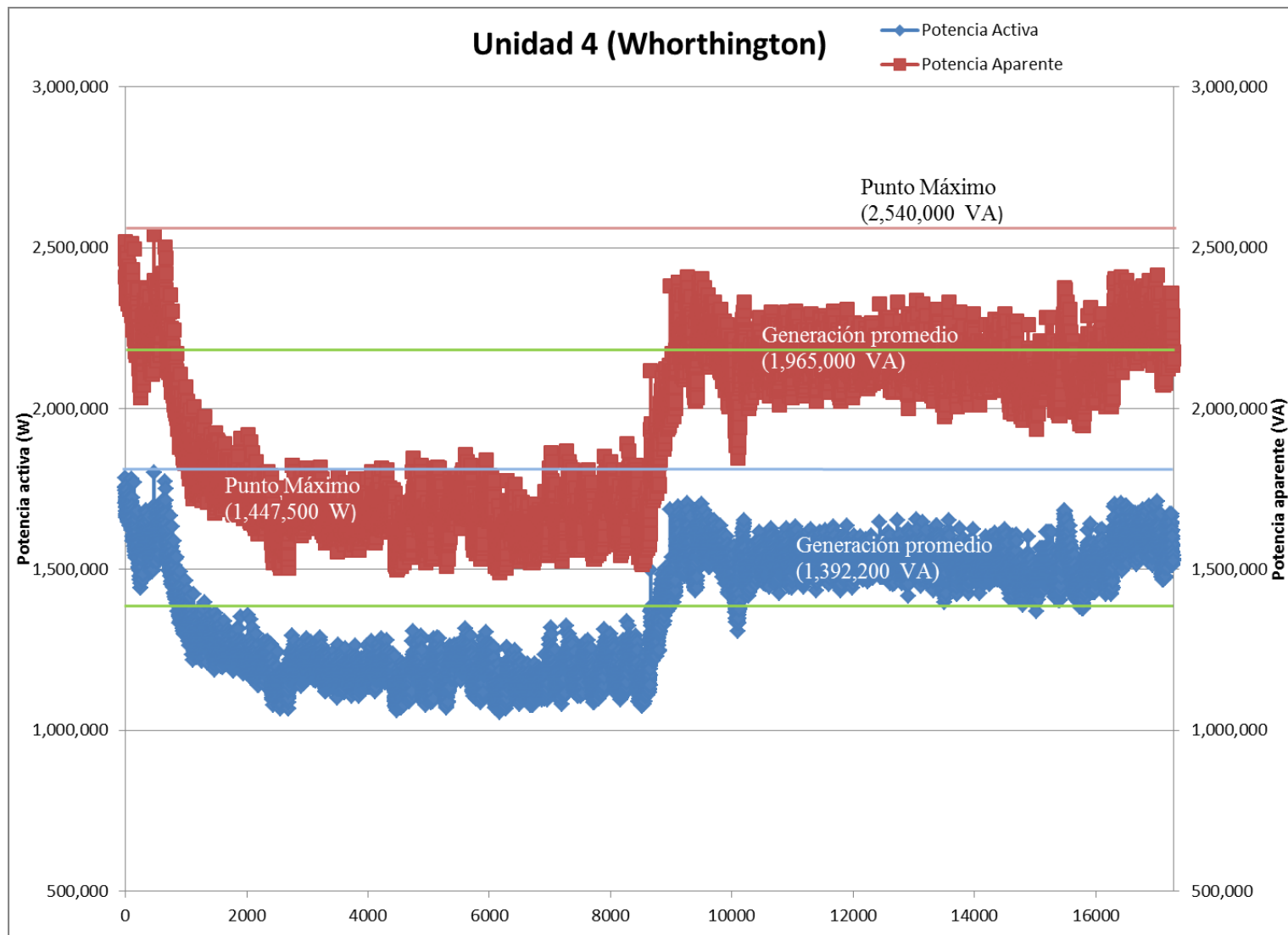
Existe variación de carga en dependencia de la molienda que a la vez depende de la capacidad de suministro de caña de parte de transporte.

La generación de activa se muestra en la serie azul, el promedio de potencia activa es de 2.177 MW, el pico máximo de activo es de 2.302 MW.

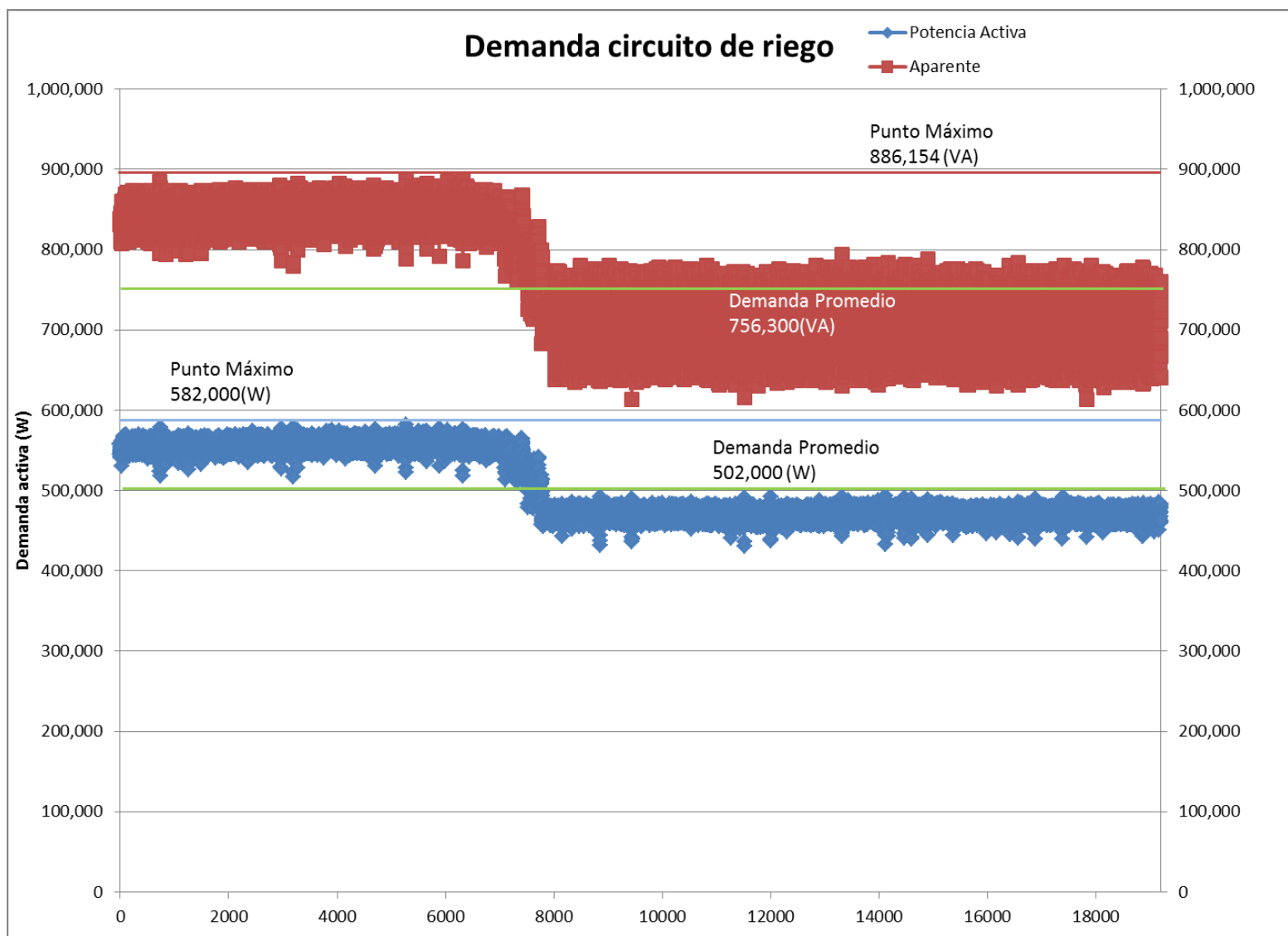
Los valores de potencia aparente se muestran en rojo, el punto máximo de potencia aparente es de 2.047 MVA y la generación promedio es de 1.935 MVA. Dichos valores máximos ocurren en la muestra 527 (5:44 pm)



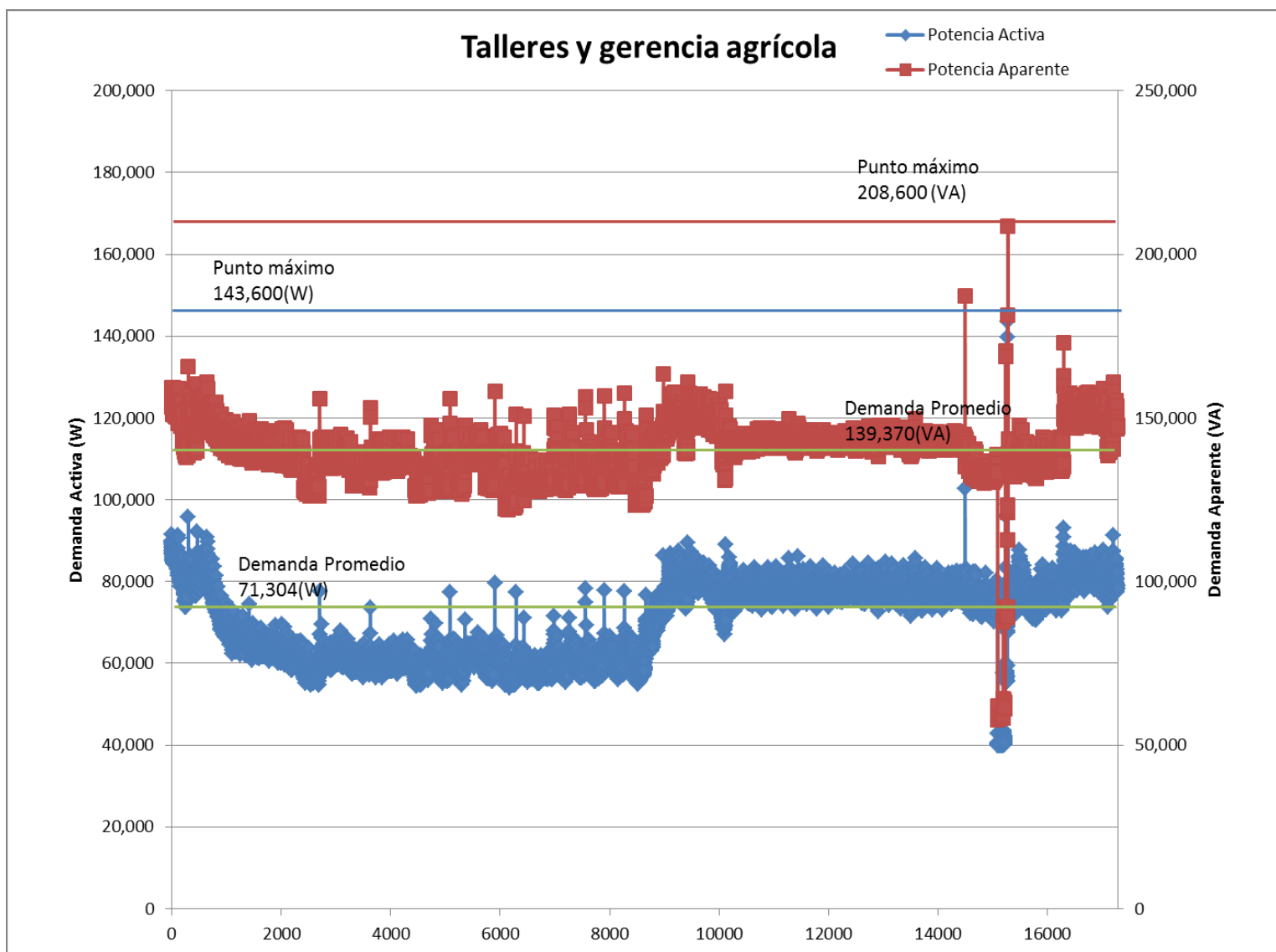
Gráfica 7.3



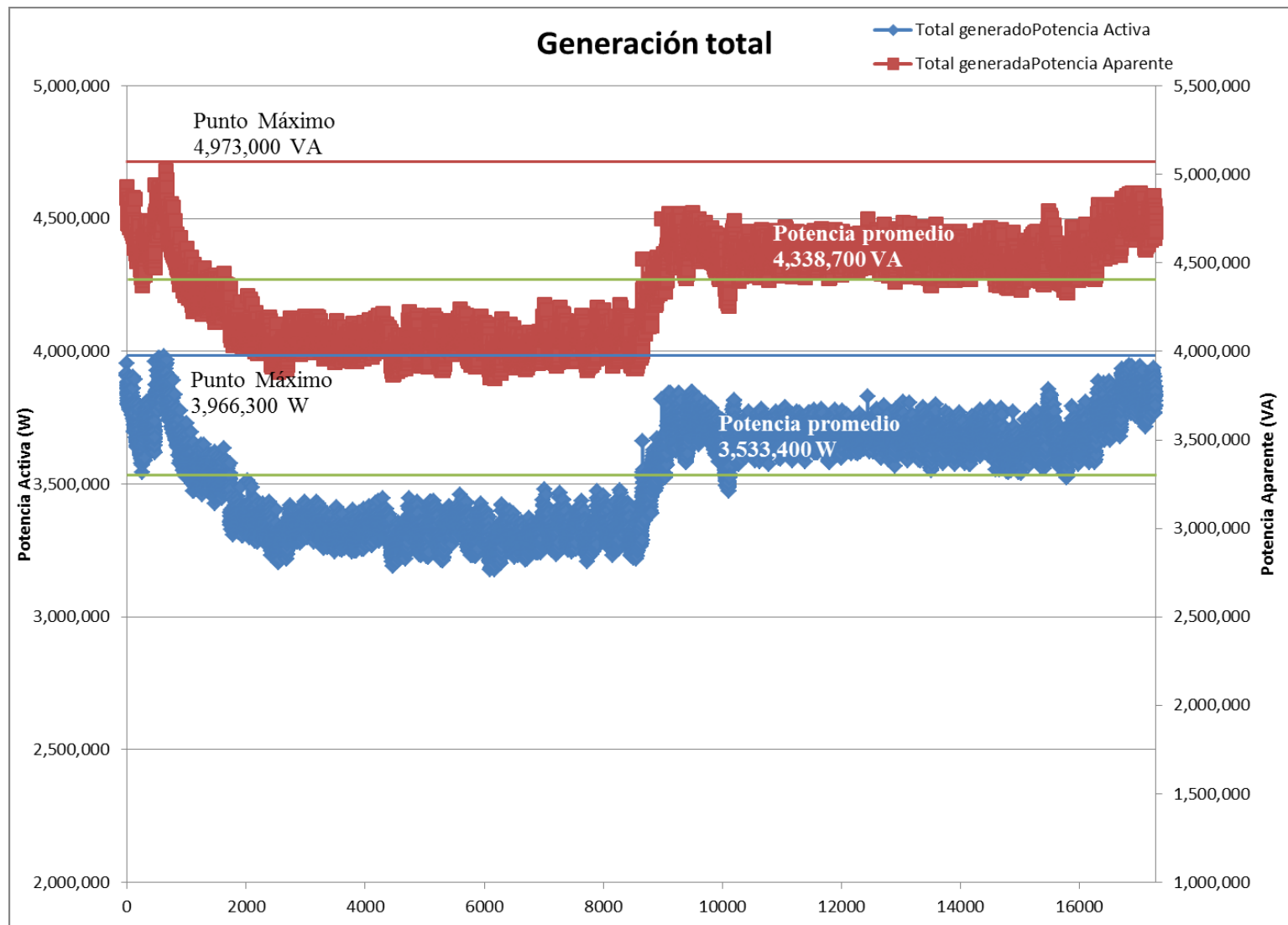
Gráfica 7.4



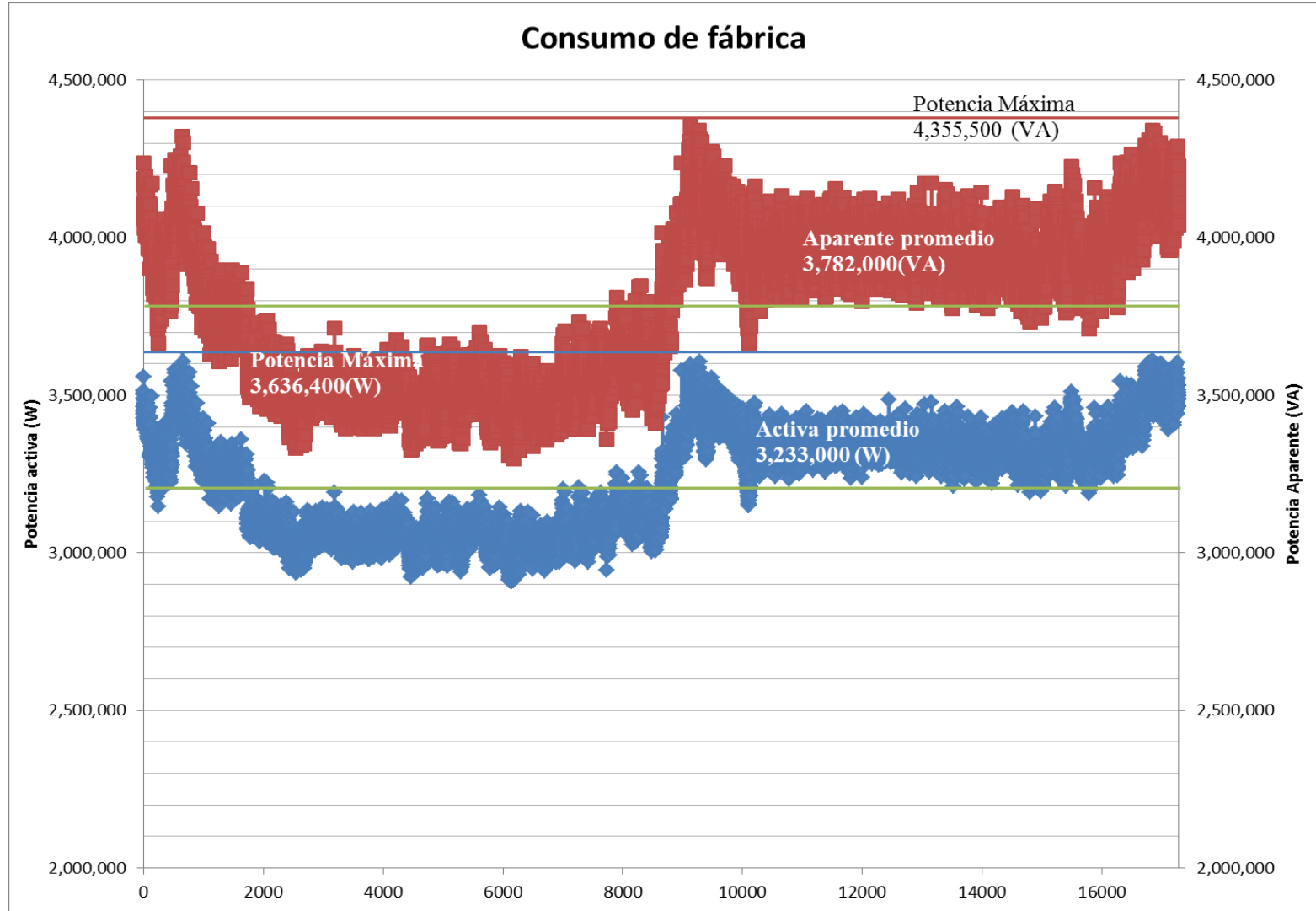
Gráfica 7.5



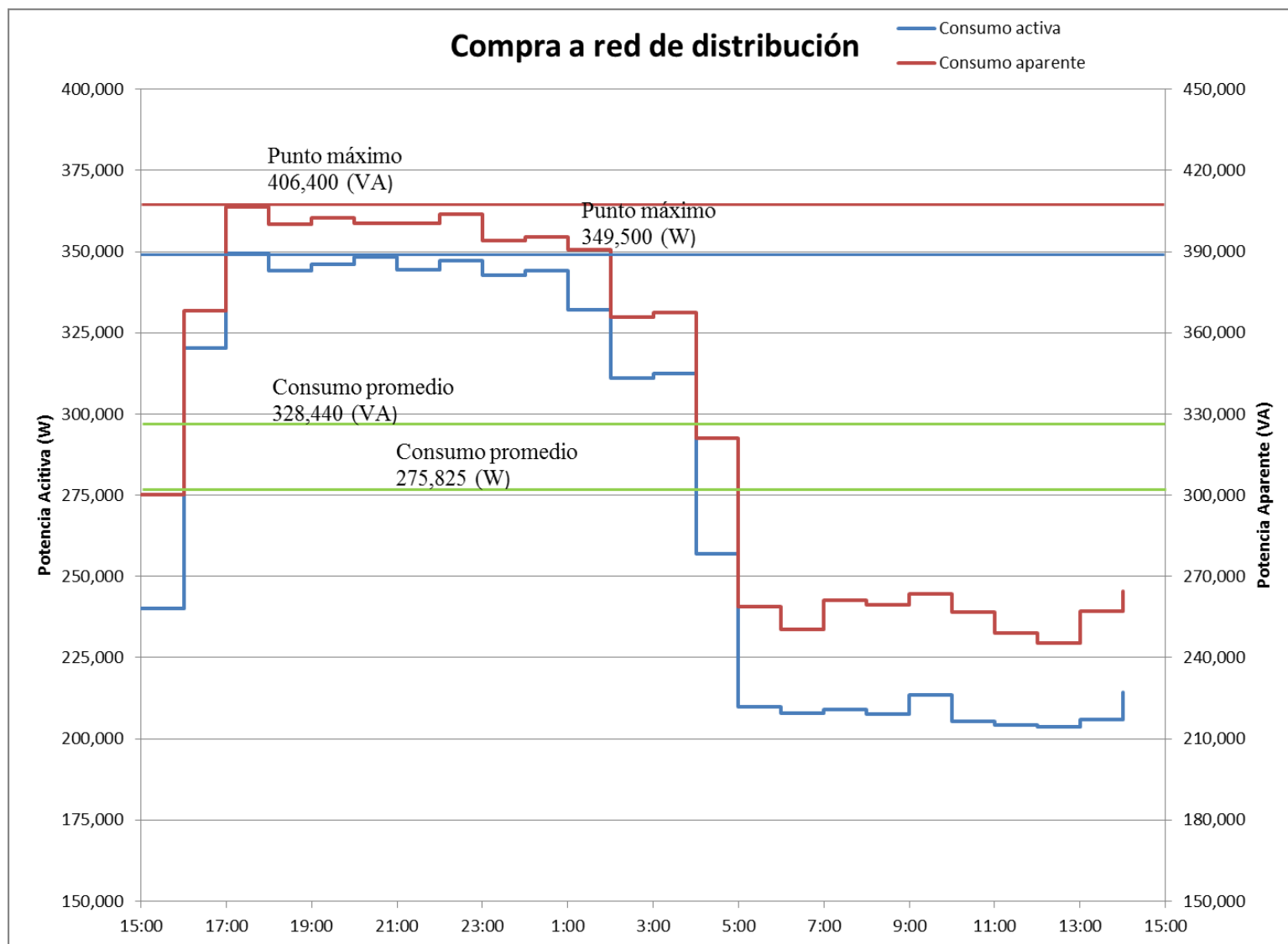
Gráfica 7.6



Gráfica 7.6



Gráfica 7.7



Gráfica 7.7

7.3 Análisis de comportamiento de curvas diarias:

7.3.1 Demanda:

Tenemos 3 curvas de demanda analizar, que son demanda de fábrica, de circuito de riego, y de talleres y gerencia.

Se revisó los siguientes factores para poder comprender el comportamiento de las cargas.

Potencia promedio:

Equivalente de potencia continua demanda por el sistema para consumir el valor de energía real que demanda la curva variable en un periodo de tiempo, en nuestro caso es 24 horas.

$$P_{\text{promedio}} = (\text{Energía diaria consumida}) / (\text{período de tiempo evaluado})$$

Horas equivalentes:

Tiempo que se requiere para consumir la misma cantidad de energía diaria con una demanda máxima estable.

$$H.E = (\text{Energía diaria consumida}) / (\text{Demanda máxima})$$

Factor de demanda:

Índice al que opera la carga total conectada al sistema.

$$F_{\text{demanda}} = (\text{Carga máxima}) / (\text{Carga Instalada})$$

Factor de utilización:

Indica la fracción de la capacidad del sistema de distribución utilizado durante la demanda máxima.

$$F_{\text{utilización}} = (\text{Carga máxima}) / (\text{Capacidad Instalada})$$

Factor de carga:

Es el grado de sostenibilidad del pico máximo de carga.

$$F_{\text{carga}} = (\text{Demanda promedio}) / (\text{Demanda máxima})$$

Factor de diversidad:

El factor de diversidad es la forma expresa la relación que existe en la coincidencia de los valores de demandas máximas en el tiempo. Este factor de diversidad entre dos o más cargas se obtiene de la siguiente manera:

$F_{div} = (\sum \text{demandas máximas individuales}) / (\text{Demanda máxima del sistema})$.

La tabla 7.1 muestra los factores y datos obtenidos de las gráficas de demanda diaria de las cargas evaluadas.

| Datos de la demanda | | | | | | | | |
|---------------------|------------|-----|--------------------|------------|-----|--------------------|-----------|-----|
| Demanda Fábrica | | U/M | Demanda Riego | | U/M | Demanda Talleres | | U/M |
| Carga instalada | 4,030,000 | W | Carga instalada | 1,451,000 | W | Carga instalada | 400,000 | W |
| Demanda Máxima | 3,636,400 | W | Demanda Máxima | 582,000 | W | Demanda Máxima | 143,600 | W |
| Consumo energía | 77,592,000 | Wh | Consumo energía | 12,480,000 | Wh | Consumo energía | 1,711,296 | Wh |
| Demanda Promedio | 3,233,000 | W | Demanda Promedio | 502,000 | W | Demanda Promedio | 71,304 | W |
| Horas equivalentes | 21.338 | H | Horas equivalentes | 21.443 | H | Horas equivalentes | 11.917 | H |
| Factor de demanda | 0.902 | | Factor de demanda | 0.401 | | Factor de demanda | 0.359 | |
| Factor de carga | 0.889 | | Factor de carga | 0.863 | | Factor de carga | 0.497 | |
| Factor de pérdidas | 0.790 | | Factor de pérdidas | 0.744 | | Factor de pérdidas | 0.247 | |
| Factor diversidad | 1.100 | | | | | | | |

Tabla 7.1

El factor de carga de fábrica y riego muestra la estabilidad de dichas cargas y un alto grado de utilización del sistema en la temporada de zafra, este efecto se logra cuando el transporte de caña es estable, manteniendo la molienda con valores constantes.

En caso de la demanda del circuito de talleres automotrices se observa un bajo valor de factores de carga y demanda, debido a la naturaleza de la carga que no es muy estable.

7.3.2 Producción de energía:

Para analizar el comportamiento de curva de generación se evaluó los siguientes factores:

Potencia disponible:

Suma de la potencia de los grupos generadores que están disponibles en determinado momento.

Factor de reserva:

Capacidad de planta para cubrir una demanda mayor a la máxima estimada.

$$F_{\text{reserva}} = (\text{Potencia disponible}) / (\text{demanda máxima})$$

Factor de Instalación:

Relación entre la capacidad instalada y la carga conectada.

$$F_{\text{Instalación}} = (\text{Capacidad Instalada}) / (\text{Carga conectada}).$$

Factor de uso de planta:

Indica el uso que se ha dado a la planta respecto a su capacidad, en este caso se utilizara el factor de uso planta porque se tiene un período de trabajo de 6 a 7 meses anuales, en caso de trabajar todo el año se prefiere conocer el factor de capacidad de planta.

$$F_{uso} = (\text{Producción anual de energía}) / (\text{Capacidad instalada} \times \text{número de horas de trabajo anual})$$

La tabla 7.2 muestra el rendimiento actual de la planta de generación del Ingenio Benjamín Zeledón.

| Planta de generación | | | | |
|---------------------------|------------|-----|-------------------------|------------|
| Demanda Fábrica | Potencia | U/M | | |
| Potencia Instalada | 7,000,000 | W | | |
| Potencia disponible | 4,000,000 | W | Energía total generada | 16,973,940 |
| Potencia conectada | 5,205,000 | W | Zafra 13-14 | Kwh |
| P.Máxima entregada | 3,266,300 | W | Dias de zafra | 199 |
| Generación energía diaria | 69,060,000 | Wh | Horas de zafra | 4776 |
| P. media diaria | 2,877,500 | | Factor de uso de planta | 0.508 |
| Factor de reserva | 1.225 | | | |
| Factor de instalación | 1.345 | | | |
| Horas equivalentes | 21.143 | | | |

Tabla 7.2

Al revisar los factores de reserva e instalación se observa que la planta está siendo sub-utilizada, aunque existe capacidad eléctrica instalada suficiente para cubrir la demanda, siempre existe un consumo considerable a la red de distribución.

Una de las principales causas de la subutilización del sistema eléctrico es la falta de abastecimiento de vapor a la turbina, debido a la baja capacidad de las calderas, este problema se evalúa en el capítulo de análisis energía térmica.

7.4 Consumo de Energía eléctrica:

Los registros de consumo y generación energética presentados por la CNPA describen el consumo de las dos principales cargas del ingenio, siendo estas la fábrica de producción de azúcar y el circuito de riego.

Los meses presentados en el historial son los meses de producción o período de zafra, los meses de reparaciones y pruebas no existe potencia generada, puesto que la demanda de energía es muy baja.

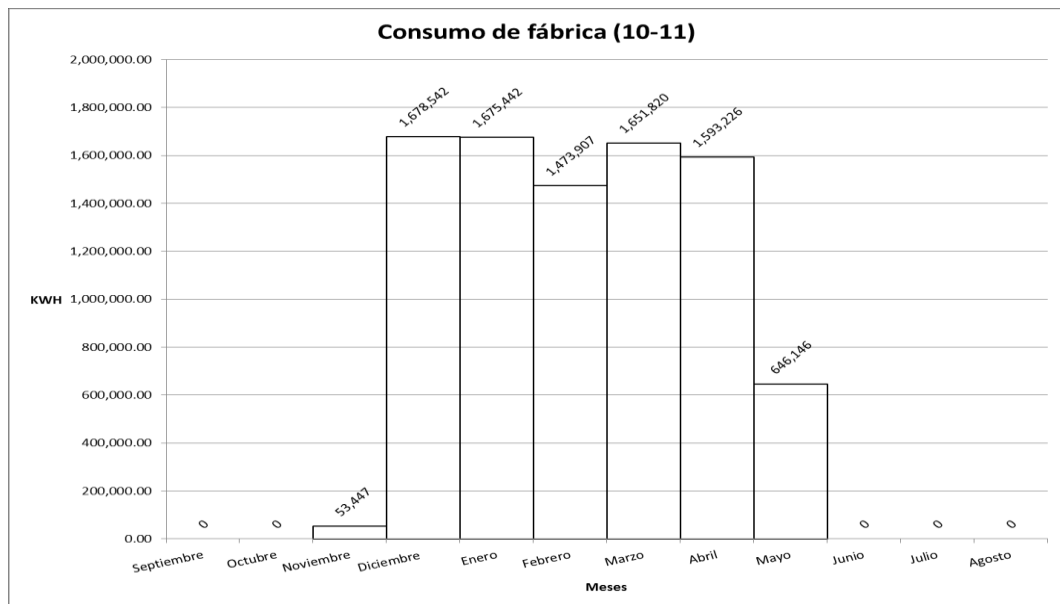
Consumo en fábrica:

Los principales accionamientos eléctricos en el área de fabricación involucran picadoras, bandas de transporte, centrifugas, colochos, mezcladores, ventiladores, grúas, bombas, etc.

Durante los meses de zafra el proceso de producción es bastante estable, reflejándose en los porcentajes de tiempos perdido que en la última zafra del Ingenio Benjamín Zeledón fue de 8.95%, el crecimiento de consumo y generación es proporcional al crecimiento de molienda y producción mostrado.

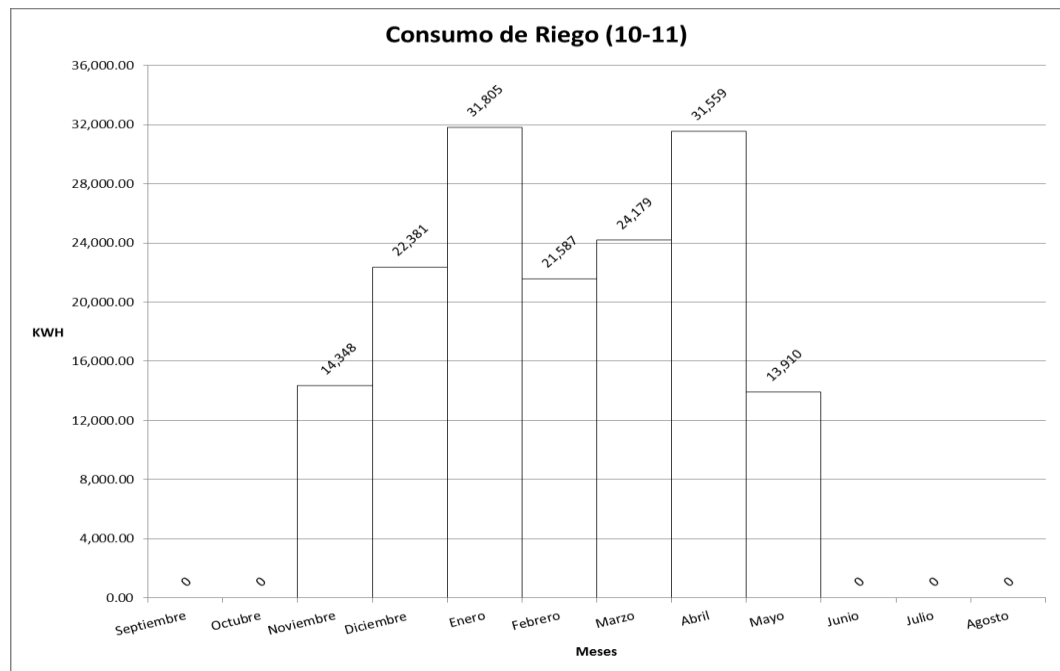
7.4.1 Demanda de energía eléctrica Zafra 2010-11:

Consumo de energía eléctrica de fábrica:



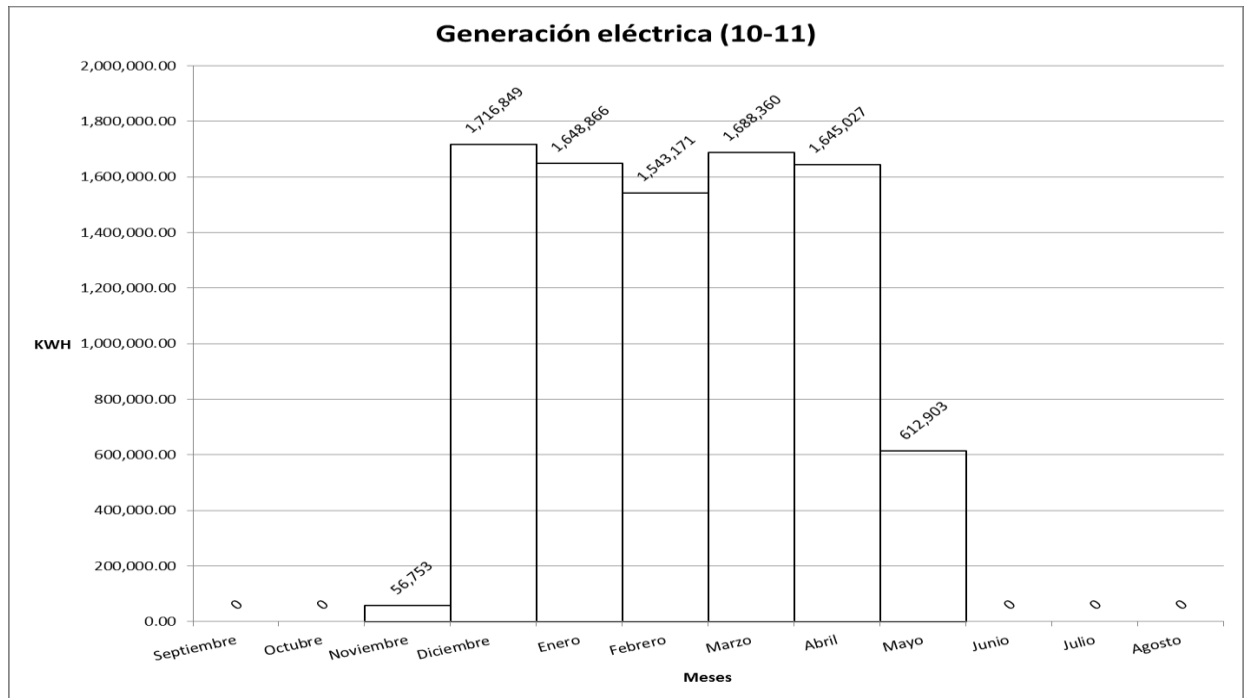
Gráfica 7.8

Consumo de energía eléctrica de riego:



Gráfica 7.9

Generación de energía eléctrica mensual:



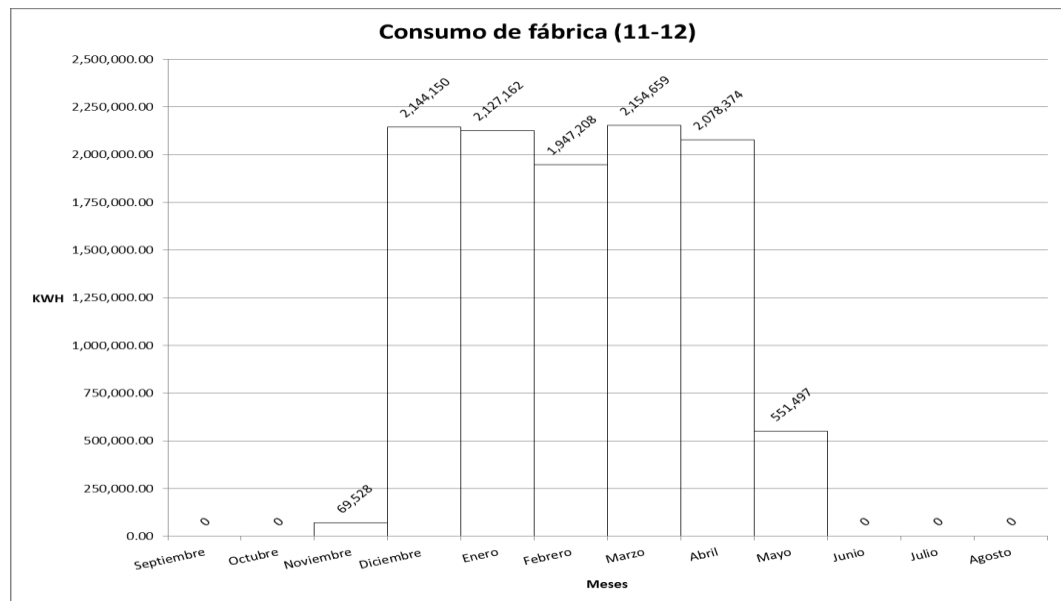
Gráfica 7.10

| Resumen de consumo eléctrico Zafra 2010-11 | | |
|---|------------------|-----------|
| Concepto | Unidad de medida | Cantidad |
| Generación energía eléctrica total | MWH | 8,911.930 |
| Consumo eléctrico de fábrica | MWH | 8,772.530 |
| Consumo eléctrico de riego | MWH | 159.770 |
| Consumo eléctrico de Auxiliares | MWH | 63.14 |
| Compra a la red | MWH | 83.50 |
| Días de zafra | Días | 163 |
| Tiempo Perdido | Horas | 881.33 |
| Promedio de generación diario | MWH | 54.674 |
| Potencia de generación | MW | 3 |
| Consumo por tonelada de caña molida | KWH/TM | 21.14 |

Tabla 7.3

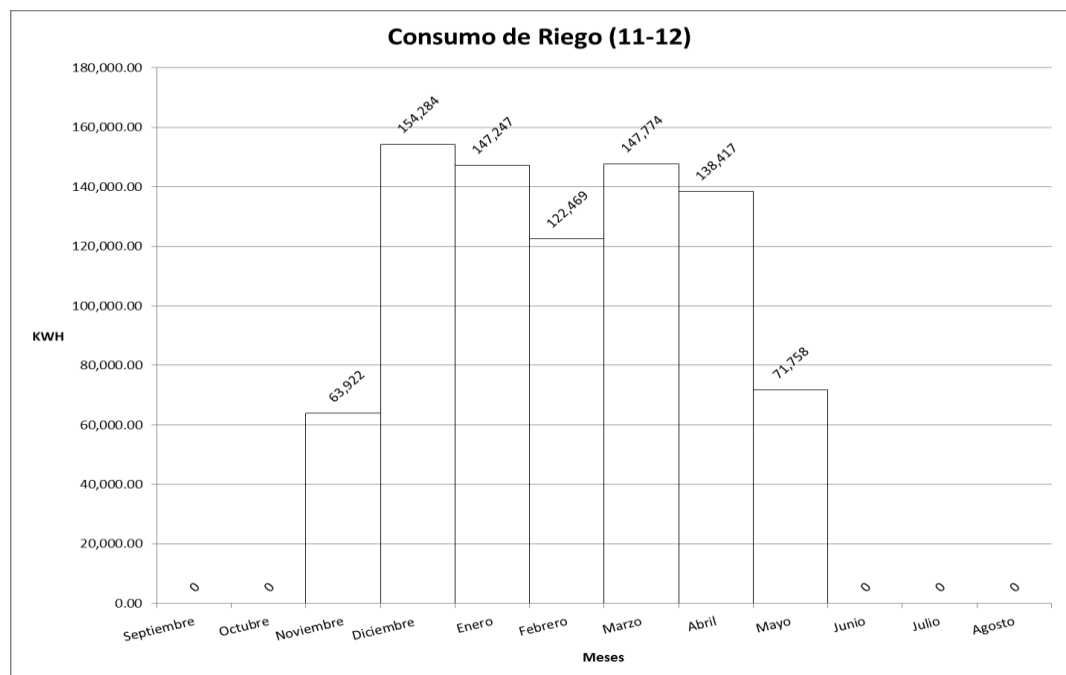
7.4.2 Demanda de energía eléctrica Zafra 2011-12:

Consumo de energía eléctrica de fábrica:



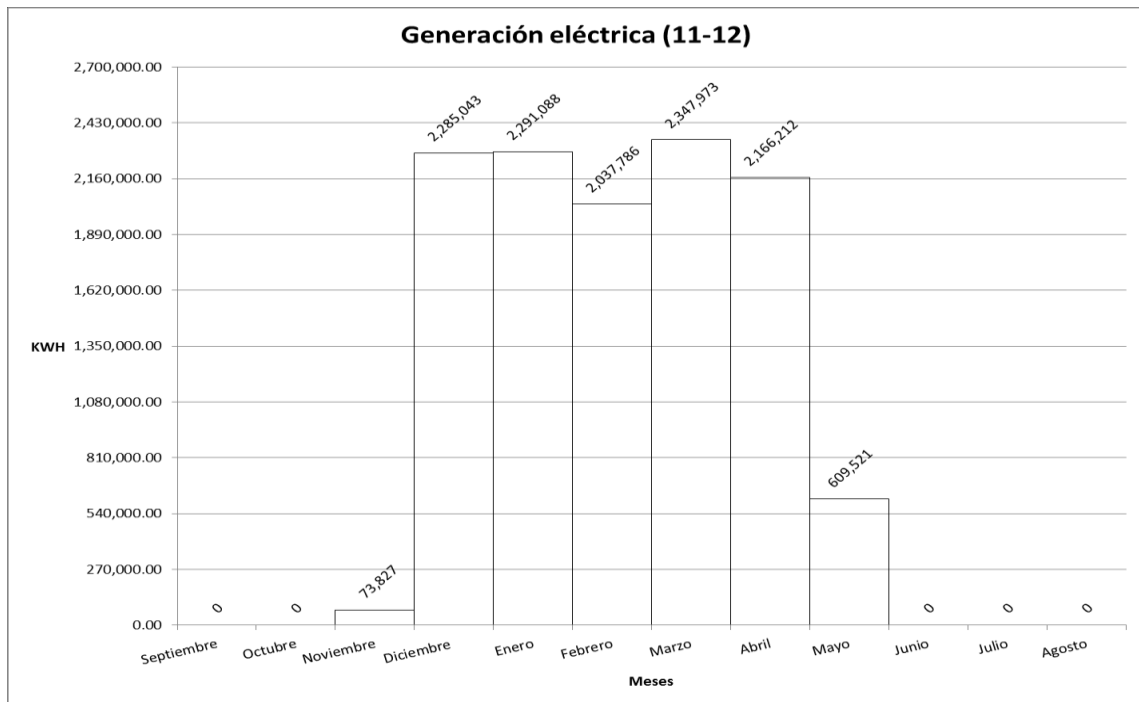
Gráfica 7.11

Consumo de energía eléctrica de riego:



Gráfica 7.12

Generación de energía eléctrica mensual:



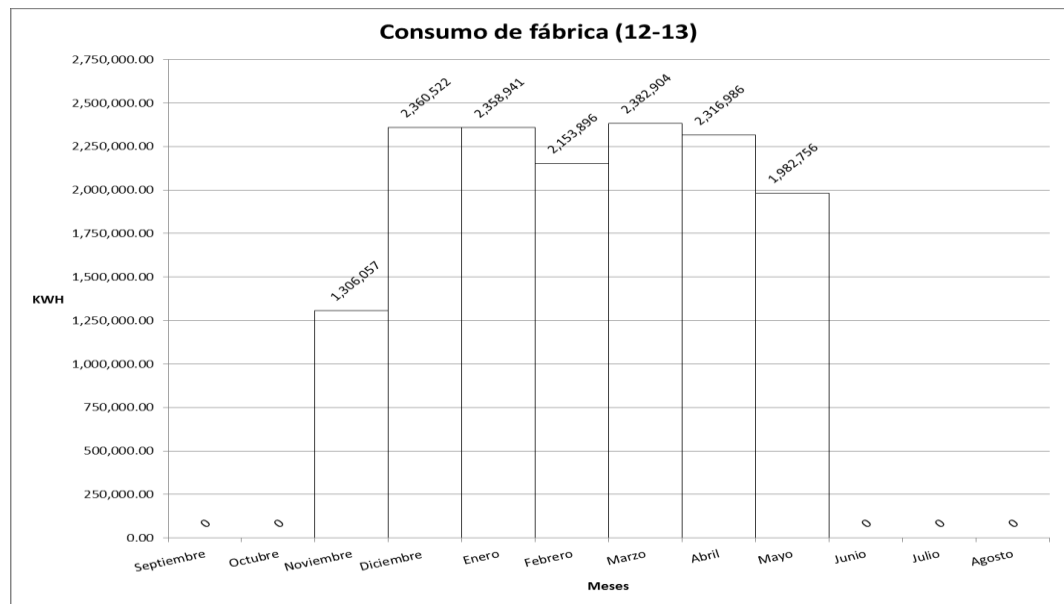
Gráfica 7.13

| Resumen de consumo eléctrico Zafra 2011-12 | | |
|---|------------------|------------|
| Concepto | Unidad de medida | Cantidad |
| Generación energía eléctrica total | MWH | 11,811.450 |
| Consumo eléctrico de fábrica | MWH | 11,072.58 |
| Consumo eléctrico de riego | MWH | 845.770 |
| Consumo eléctrico de Auxiliares | MWH | 113.420 |
| Compra a la red | MWH | 220.30 |
| Días de zafra | Días | 160 |
| Tiempo Perdido | Horas | 746.48 |
| Promedio de generación diario | MWH | 73.82 |
| Potencia de generación | MW | 4 |
| Consumo por tonelada de caña molida | KWH/TM | 21.14 |

Tabla 7.4

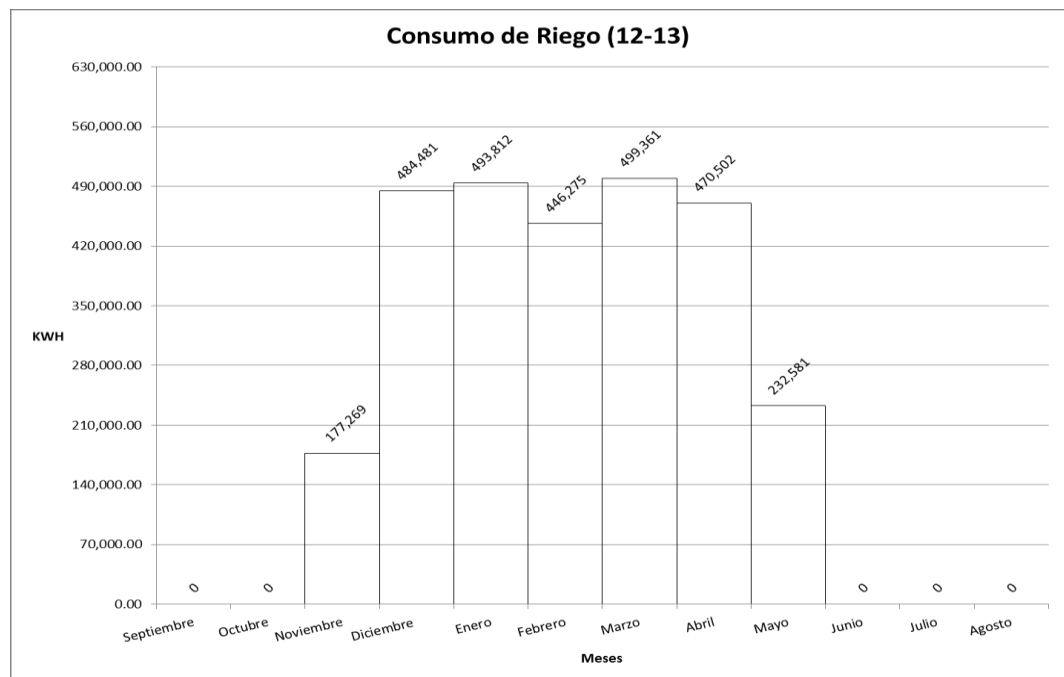
7.4.3 Demanda de energía eléctrica Zafra 2012-13:

Consumo de energía eléctrica de fábrica:



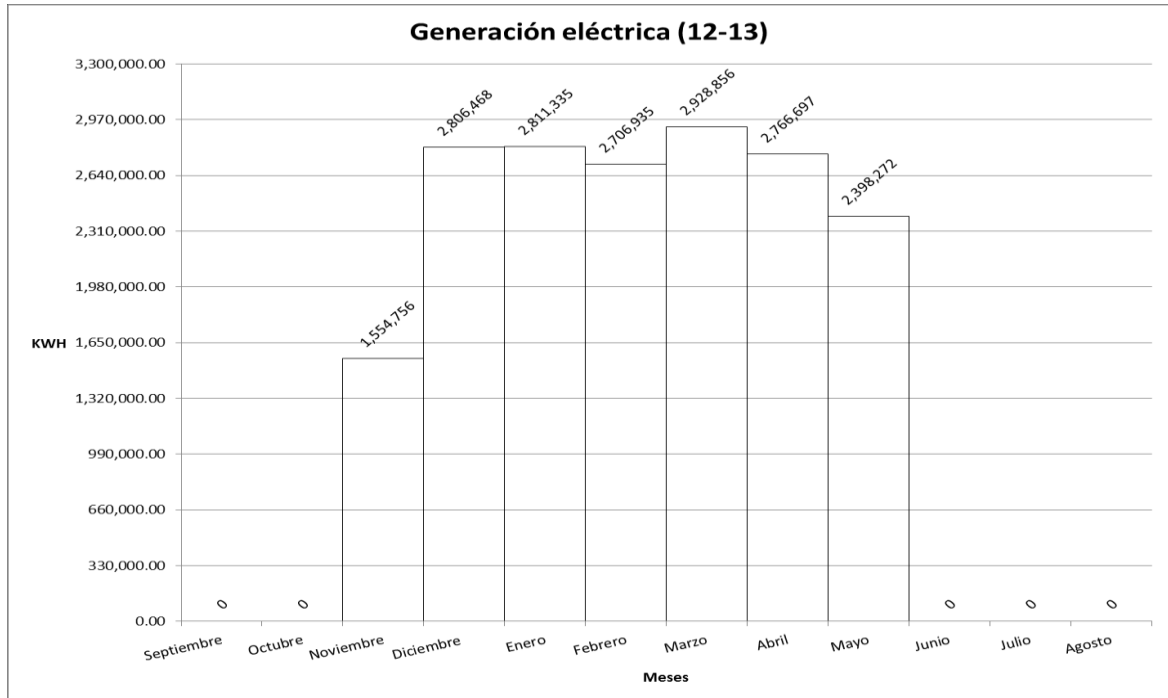
Gráfica 7.14

Consumo de energía eléctrica de riego:



Gráfica 7.15

Generación de energía eléctrica mensual:



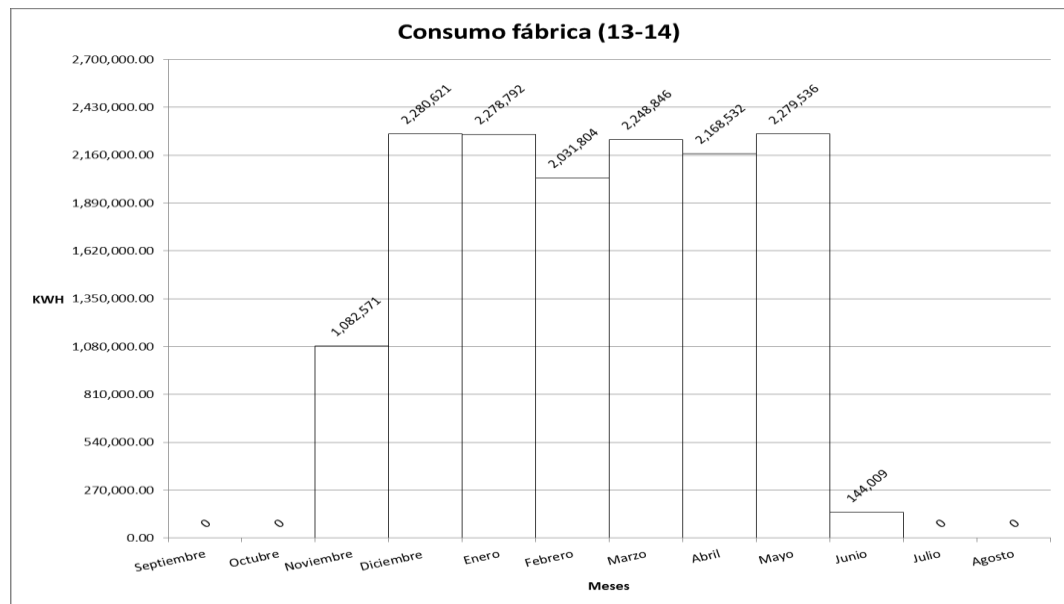
Gráfica 7.16

| Resumen de consumo eléctrico Zafra 2012-13 | | |
|---|------------------|-----------|
| Concepto | Unidad de medida | Cantidad |
| Generación energía eléctrica total | MWH | 17,973.32 |
| Consumo eléctrico de fábrica | MWH | 14,862.06 |
| Consumo eléctrico de riego | MWH | 2,804.28 |
| Consumo eléctrico de Auxiliares | MWH | 338.61 |
| Compra a la red | MWH | 31.63 |
| Días de zafra | Días | 193 |
| Tiempo Perdido | Horas | 744.49 |
| Promedio de generación diario | MWH | 93.126 |
| Potencia de generación | MW | 4.6 |
| Consumo por tonelada de caña molida | KWH/TM | 27.88 |

Tabla 7.5

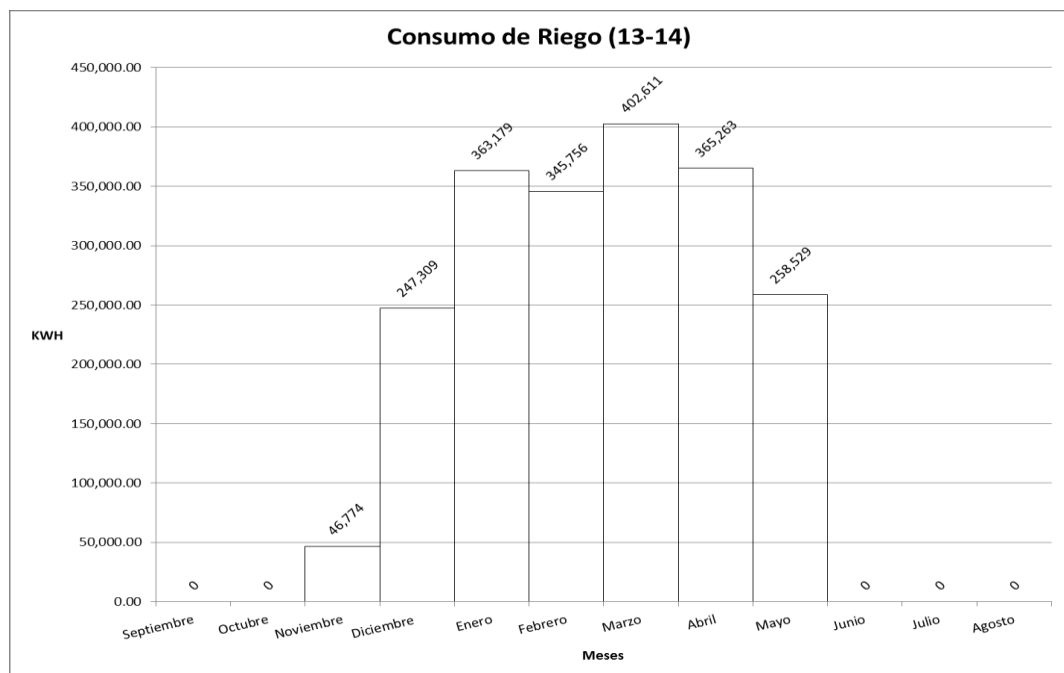
7.4.4 Demanda de energía eléctrica Zafra 2013-14:

Consumo de energía eléctrica de fábrica



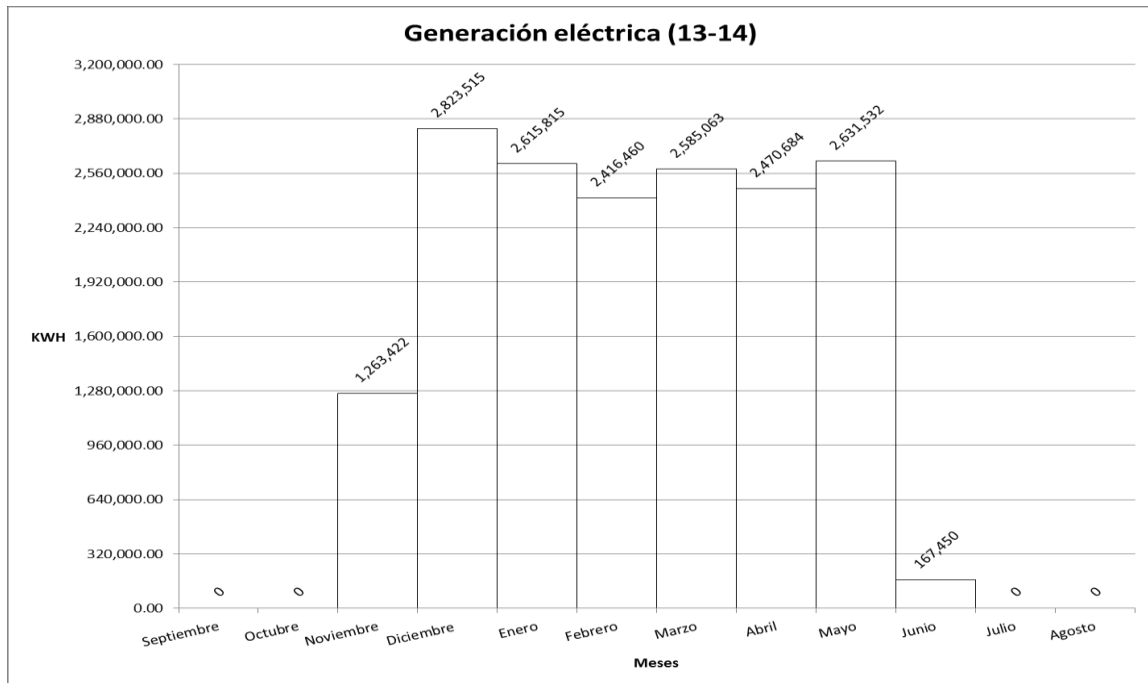
Gráfica 7.17

Consumo de energía eléctrica de riego:



Gráfica 7.18

Generación de energía eléctrica mensual:



Gráfica 7.19

| Resumen de consumo eléctrico Zafra 2013-14 | | |
|---|------------------|-----------|
| Concepto | Unidad de medida | Cantidad |
| Generación energía eléctrica total | MWH | 16,973.94 |
| Consumo eléctrico de fábrica | MWH | 14,514.71 |
| Consumo eléctrico de riego | MWH | 2,029.42 |
| Consumo eléctrico de Auxiliares | MWH | 454.20 |
| Compra a la red | MWH | 24.39 |
| Días de zafra | Días | 199 |
| Tiempo Perdido | Horas | 429.33 |
| Promedio de generación diario | MWH | 85.296 |
| Potencia promedio de generación | MW | 3.5 |
| Consumo por tonelada de caña molida | KWH/TM | 22.06 |

Tabla 7.6

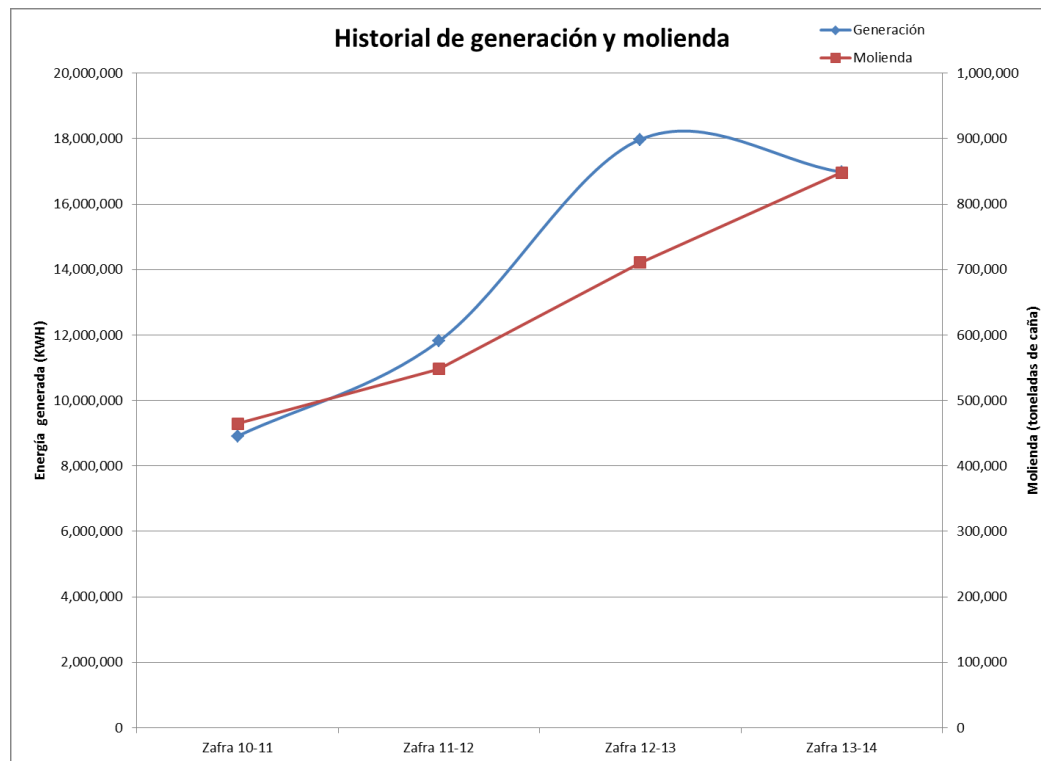
7.5 Historial de generación y molienda:

La tabla 7.7 muestra los valores de molienda y generación de las ultimas 4 zafras del ingenio Benjamín Zeledón, obtenidas del registro estadístico de la CNPA.

| Historial de producción | | | | | | | | |
|-------------------------|------------|-----|----------|-------|-------------|--------|---------------------|----|
| | Generación | | Molienda | | Rendimiento | | Producción (Azucar) | |
| Zafra 10-11 | 8,911,930 | KWH | 464,694 | Ton.M | 19.178053 | KWH/TM | 1,042,464 | QQ |
| Zafra 11-12 | 11,811,450 | KWH | 547,746 | Ton.M | 21.5637239 | KWH/TM | 1,236,875 | QQ |
| Zafra 12-13 | 17,973,320 | KWH | 710,554 | Ton.M | 25.2947875 | KWH/TM | 1,502,453 | QQ |
| Zafra 13-14 | 16,973,940 | KWH | 848,085 | Ton.M | 20.014442 | KWH/TM | 1,543,600 | QQ |

Tabla 7.7

Es notable que la molienda se ha incrementado en un 200% en las ultimas 4 zafras, igual que la generación de energía.



Gráfica 7.20

La gráfica 7.20 muestra el crecimiento de la generación de energía y la molienda, mostrando una alta dependencia entre ellos. La zafra 12-13 muestra un alto valor de energía generada, pero es notable una disminución en el rendimiento de fabricación o la relación producción-molienda.

Este efecto es notable debido al bajo rendimiento de molienda y calidad de la caña procesada, puesto que hay una deficiente extracción, generando mayor disponibilidad de bagazo y menor material para producción de azúcar.

7.6 Proyección de crecimiento 2015-16

El crecimiento planeado de molienda, exige un aumento en la capacidad de producción, molienda y generación de energía.

Demanda en circuito de fábrica:

Para analizar el comportamiento futuro de demanda se dividió el consumo de fábrica en 2 consumos principales, extracción o molienda, y fabricación con generación, debido a que el cambio en el sistema de molienda aportara un cambio considerable en el comportamiento de la demanda.

Molienda o Extracción:

Al sustituir las turbinas de la picadora, instalar una desfibradora, y cambiar el sistema de molienda, el sistema de extracción incrementará en gran medida la potencia instalada del sistema eléctrico.

La potencia instalada actual de equipos de extracción es de 512KW, puesto que es solo referido a equipos auxiliares de extracción, la potencia instalada futura será de 5,221 KW.

Los equipos de gran consumo se detallan a continuación:

| Equipo | KW |
|---------------------------|-------|
| DESFIBRADORA EN 4,160V | 1,300 |
| Cuchilla PICADORA EN 480V | 600 |
| MOTOR EN 480V MOLINO 1 | 600 |
| MOTOR EN 480V MOLINO 2 | 600 |
| MOTOR EN 480V MOLINO 3 | 600 |
| MOTOR EN 480V MOLINO 4 | 600 |
| MOTOR EN 480V MOLINO 5 | 600 |
| Total | 4,900 |

Gráfica 7.21

La proyección de este sistema está diseñada para un crecimiento de molienda sostenida de 10,000 toneladas de caña, los valores de ajuste de las protecciones es de 1.25 la potencia nominal. Este tipo de accionamiento tiene un alto valor de sobrecarga por la naturaleza altamente variable de la alimentación del chute de los molinos.

El valor de potencia máxima a consumir será:

$$\text{Potencia máxima} \leq [(\text{Potencia instalada}) * (1.25)] = 6,125 \text{ KW}$$

La potencia máxima asumida en este caso se realizó de esta manera debido a que la carga de molinos al depender del volumen de caña en el chute, al tener molinos en serie y con velocidades distintas la disminución de volumen de caña es mínimo entre un molino a otro, por esto la demanda de energía de los molinos es prácticamente la misma. Este comportamiento también afecta la desfibradora y la picadora.

Por esta razón dejamos el peor escenario posible en demanda, que estará limitado por la protección al equipo, en este caso 1.25 veces la potencia nominal.

El restante de potencia instalada en extracción es de equipos auxiliares, como bombas de lubricación, bandas transportadoras, etc; esta demanda será incluida en el comportamiento de carga de fabricación y generación.

Fabricación:

El incremento de la producción será asumido por la instalación de una línea de producción paralela a la existente, llevando la carga instalada de 1,344 KW hasta 3,038 KW.

El comportamiento de la demanda se estima igual a la actual, por esto se utilizó los factores obtenidos en la curva de demanda actual, para estimar el comportamiento de fabricación y generación.

$P_{\text{máxima estimada}} = (\text{Factor de demada}) * (\text{Carga instalada})$

$P_{\text{máxima estimada fabricación}} = (0.902) * 3,038 \text{ KW} = 2,740.276 \text{ KW}$

Riego:

La capacidad de riego también se ve afectada, se estima un crecimiento de 80% de la potencia instalada en dicho circuito, el comportamiento de dicha carga no debe sufrir muchos cambios, puesto que este tipo de carga depende del horario definido por gerencia de campo.

$P_{\text{máxima estimada riego}} = (0.401) * (2,600 \text{ KW}) = 1,042 \text{ KW}$

Demanda máxima total:

Al sumar las demandas máximas individuales, obtenemos un total de 9,907 KW, con un factor de coincidencia de 1.1 obtenido de las curvas diarias, obtenemos un valor de demanda máxima estimada de:

$$\text{Demanda máxima estimada} = (9,907 \text{ KW}) / (1.1) = 9,006 \text{ KW}$$

Esta será la potencia máxima que la planta deberá entregar con la máxima capacidad de molienda, de las futuras instalaciones de la fábrica.

El valor de potencia máxima a generar se debe añadir la demanda de los equipos de caldera, esta demanda será tratada como consumo propio de planta, y depende de la caldera a implementar, que se define en tamaño de planta, en este caso la potencia instalada es de 2,740 KW.

El comportamiento de la planta se toma como la curva de fábrica actual, puesto que siempre será dependiente de la molienda.

Utilizando la relación de factor de demanda obtenemos:

$$\text{Potencia máxima de consumo propio} = (0.902) * 2,740 \text{ KW} = 2,466 \text{ KW}.$$

Con factor de diversidad 1.1 sabemos que:

$$\text{Potencia máxima de generación} = (9,907 + 2,466) \text{ KW} / 1.1 = 11,248 \text{ KW}$$

La planta de generación debe tener la capacidad de asumir este valor, por esto es necesario un valor de potencia disponible igual o superior a 12 MW.

8. Análisis de demanda de Vapor

8.1 Descripción de consumo de vapor:

El consumo de vapor tiene por principales cargas las turbinas de molienda, los turbogeneradores, y los evaporadores, estos últimos trabajan con una presión de 20 PSI; en la figura 8.1 podemos observar el ciclo de vapor utilizado en el Ingenio Benjamín Zeledón:

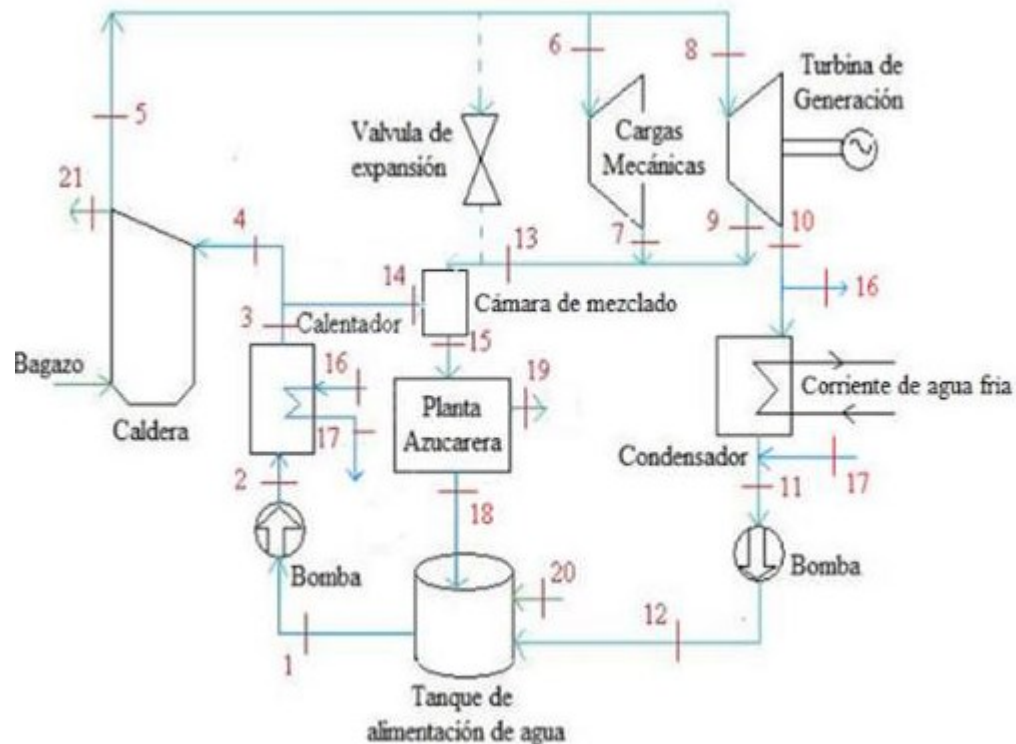


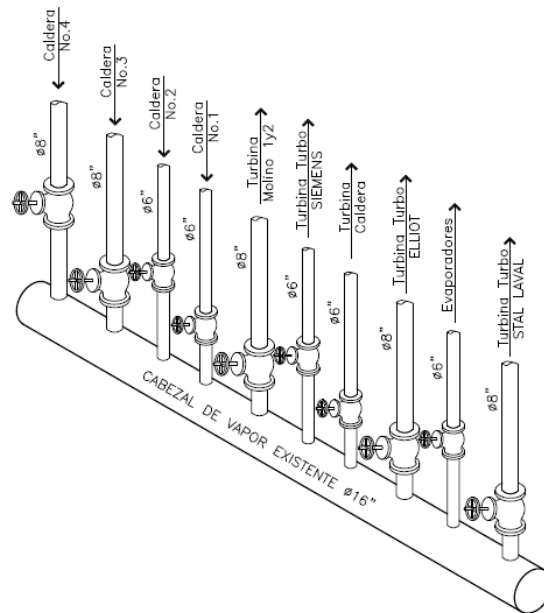
Figura 8.1

En el punto 13 de la figura podemos observar que la salida del vapor de las turbinas es dirigido a la planta, que en este caso se refiere a los evaporadores; al no satisfacer la demanda de vapor de las turbinas, se utiliza una válvula de expansión para poder disminuir la presión a 20 PSI.

Este ciclo de vapor notablemente desperdicia un salto entálpico, es una práctica muy ineficiente de satisfacer la demanda de los evaporadores.

Las turbinas de molienda, se refiere a las turbinas que accionan la picadora y la desfibradora de caña de azúcar, estas al igual que la turbina de los turbogeneradores trabajan con una presión de 250 PSI, por esto están conectadas directamente al cabezal de distribución de vapor.

La distribución de flujo de vapor se realiza en un cabezal de vapor, que es que un nodo de distribución de la carga de vapor, la siguiente imagen muestra el cabezal instalado en el ingenio:



ISOMETRICO ACTUAL DE CABEZAL DE VAPOR

Figura 8.2

En la figura 8.2 podemos observar la dirección de los flujos, donde tenemos una alimentación de las 4 calderas al nodo, y las cargas de las turbinas y a los evaporadores, que luego atraviesa por una válvula de expansión.

Los circuitos de alimentación a los evaporadores se dividen en 2 alimentaciones principales, para poder mantener la presión estable en todo el evaporador.

Las válvulas de alimentación de los turbos de la unidad 2, y 3 están cerradas, puesto que estos equipos no están trabajando

8.2 Demanda de vapor:

Los valores de consumo de dichos equipos son los siguientes:

| Flujos de vapor nominales del Ingenio Benjamín Zeledón | | | |
|--|------------------|-------------------|----------------|
| Equipo | Demanda de vapor | Nombre de caldera | Flujo generado |
| Turbina picadora | 13,000 lb/h | Caldera 1 | 30,000 lb/h |
| Turbina desfibadora | 20,000 lb/h | Caldera 2 | 25,000 lb/h |
| Turbina molino | 15,000 lb/h | Caldera 3 | 70,000 lb/h |
| Turbogenerador 1 | 55,000 lb/h | Caldera 4 | 70,000 lb/h |
| Turbogenerador 2 | 35,000 lb/h | Total generado | 195 Klb/h |
| Turbogenerador 3 | 37,000 lb/h | | |
| Turbogenerador 4 | 34,000 lb/h | | |
| Evaporador 1,2,3 | 35,000 lb/h | | |
| Evaporador 4,5,6 | 15,000 lb/h | | |
| Total | 260 Klb/h | | |
| Demanda | 187 Klb/h | | |

Tabla 8.1

Consumo de Turbo generadores y Turbinas de molienda:

La presión de entrada de las turbinas es de 250 PSI con temperatura de 280°C, el vapor de salida tiene presión de 20 PSI, como vapor sobre-calentado, los turbogeneradores de la unidad 2 y 3, no están en funcionamiento puesto que no existe capacidad de satisfacer la demanda de vapor de estos equipos.

Existe una demanda insatisfecha de 73 Klb/h de vapor respecto a la capacidad total instalada de los circuitos de vapor.

Este efecto causa demanda insatisfecha eléctrica, puesto que de existir suficiente capacidad de generación de vapor, podría trabajar la unidad 3 de generación con capacidad de 1.5 MW pudiendo satisfacer la compra a la red de distribución, que tiene un consumo máximo de 349.5 KW.

Consumo de evaporadores:

La presión del vapor entrante es de 20 PSI, con temperatura de 100°C, en condiciones de vapor sobrecalentado, el consumo de los evaporadores es de 50,000 lb/h, el vapor de salida es de 10 PSI, en condiciones de saturación, dirigiéndose al condensador, para reutilizar el agua de alimentación al economizador.

8.3 Generación actual de vapor:

Las 4 calderas trabajan en un ciclo de Rankine tradicional, que consta de bomba de alimentación, un economizador, domo de caldera, recalentador de vapor, una turbina de expansión y un intercambiador de calor, en la figura 8.3 se muestra un ciclo de Rankine tradicional.

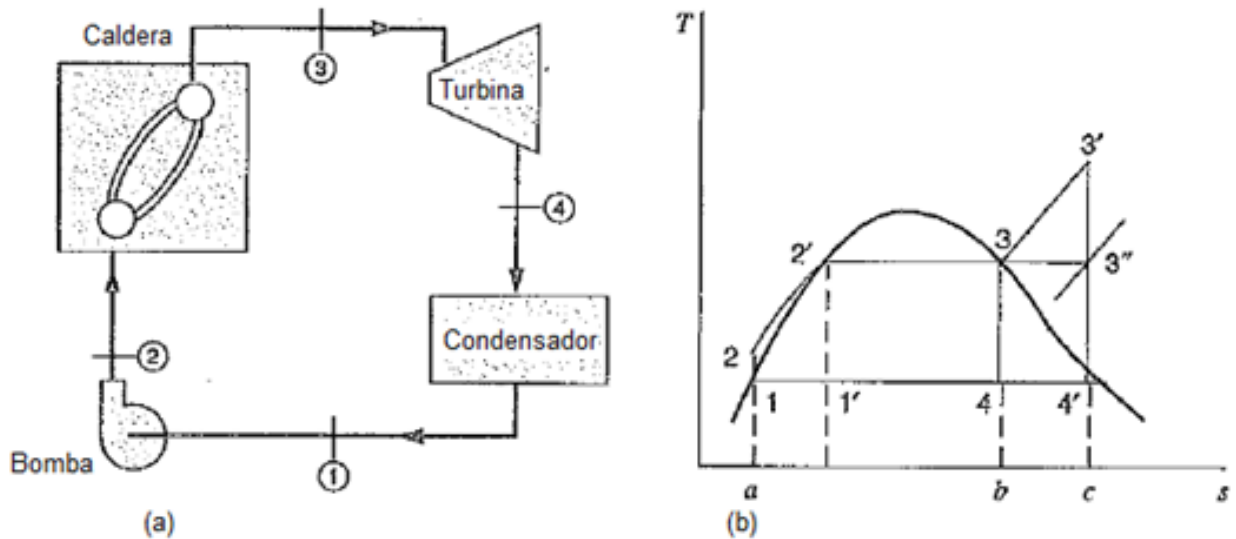


Figura 8.3

En el caso del ciclo termodinámico del sistema de generación del Ingenio, el proceso de 2 hasta 2' es realizado por un economizador o bien un pre calentador de vapor, alimentado de los gases de escape de la caldera.

A continuación se presentan los datos de cada etapa del ciclo:

Presión constante: 250 PSI

Temperatura de saturación: 190°C

Temperatura máxima de vapor sobrecalentado: 280°C

Se procede a calcular los valores de potencia útil, y eficiencia del ciclo:

$$\omega_T = h_3 - h_4$$

h_3 = entalpía de vapor sobre calentado a 250 PSI y 280°C, al buscar en tablas de propiedades de estado Van Wylen, obtenemos

$$h_3 = 1283.33 \text{ Btu/lbm} ; S_3 = 1.61745 \text{ Btu/lbm R}$$

Sabemos que $S_3=S_4$; $P_4=1.27\text{PSI}$ (presión de condensador)

$S_4= 1.61745$ está en condiciones de saturación; se busca la calidad y luego la entalpia.

$$S_4= 0.1473+(X_4*1.8101) \quad X_4=0.8122$$

$$h_4= 78.01+(0.8122*1031.28)=915.61 \text{ Btu/lbm}$$

El trabajo neto disponible es igual:

$$W_t= 1283.33 - 915.61 = 367.72 \text{ Btu/ lbm}$$

Calor transferido en las calderas:

$$q_c = h_3 - h_2$$

$$h_2= h_1 + w_p$$

w_p = trabajo de la bomba

$$w_p = h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP$$

W_p = volumen especifico x $(P_2 - P_1)$

Obtenemos el volumen especifico de la tabla a $1.47\text{PSI} = 0.01617 \text{ ft}^3/\text{lbm}$

$$W_p= 0.01617 \text{ ft}^3/\text{lbm} * (250-1.47) * (144/778)= 0.7438 \text{ Btu/lbm}$$

Buscamos h_1 en tablas con una presión de 1.47PSI

$$h_1 = 78.01 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_2= 78.01+0.7438 \text{ btu/lbm}= 78.754 \text{ btu/lbm}$$

$$Q_c= h_3 - h_2 = 1283.33 - 78.754 = 1,204.246 \text{ btu/lbm}$$

La eficiencia del ciclo termodinámico será

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_c} = \frac{w_T - w_p}{q_c}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{367.72-0.7438}{1,204.246} \left(\frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \right) = 30.47 \%$$

8.4 Demanda futura de vapor:

Las cargas de turbinas de molienda serán eliminadas, puesto que se accionara con motores eléctricos, la picadora, la desfibradora y los molinos a instalar, reduciendo así 48,000 lb/h en el consumo de vapor.

En el caso de los evaporadores, se aumentará la demanda puesto que se instalará una nueva línea de producción, llevando la demanda de vapor a 110,000 lb/h de consumo de vapor a 20 PSI.

El consumo referido a los turbogeneradores se definirá en la propuesta de potencia de la planta de cogeneración.

9. Disponibilidad del bagazo y poder calorífico

9.1 Disponibilidad del bagazo:

La disponibilidad del bagazo de caña es proporcional a la disponibilidad de caña de azúcar, y el rendimiento de producción de bagazo, para esto necesitamos conocer los siguientes datos:

- Áreas cultivadas y rendimiento agrícola
- Caña total entregada para proceso y eficiencia de transporte
- Total de caña molida y Bagazo producido

Áreas cultivadas y rendimiento agrícola

El área cultivada en el ingenio se divide en áreas de cosecha propia y colonos, los últimos son áreas cosechadas por el ingenio pero algunas no son cultivadas por el Ingenio, por lo que existe variación de eficiencia de las áreas de cosecha.

| Zafra | Área cosechada | | Rendimiento de cultivo | |
|---------|------------------|--------------|------------------------|------------------|
| | Del Ingenio (Mz) | Colonos (Mz) | Del Ingenio (T.C/Mz) | Colonos (T.C/Mz) |
| 2013-14 | 7,735.79 | 3,384.68 | 80.82 | 72.9 |
| 2012-13 | 7,806.90 | 2,323.64 | 75.71 | 66.8 |
| 2011-12 | 6,609.89 | 2,861.51 | 64.6 | 61.81 |
| 2010-11 | 5,540.10 | 2,524.00 | 60.91 | 61.4 |

Tabla 9.1

La tabla 9.1 muestra las áreas totales de cosechas de las últimas 4 zafras, en las cuales existe un crecimiento de un 42% en las áreas de cosecha, además se puede observar que existe un alto crecimiento en el rendimiento del cultivo, este rendimiento depende de las técnicas de agricultura y de la calidad del invierno.

Caña total entregada para proceso y eficiencia de transporte

Uno de los procesos más importantes de la producción es el transporte de la caña hasta la molienda, y es un proceso que conlleva pérdidas de la materia, la eficiencia de este proceso depende de la calidad de corta de la caña, y del trato de la materia durante el transporte.

La tabla 9.2 muestra las cantidades de caña disponibles para molienda de las últimas 5 zafras, y la eficiencia de transporte.

| Zafra | Caña entregada para molienda | | Eficiencia del transporte | |
|---------|------------------------------|--------------|---------------------------|-----------------------|
| | Ingenio (Mz) | Colonos (Mz) | Ingenio (T.C.E/TCC) | Colonos (T T.C.E/TCC) |
| 2013-14 | 606,276.09 | 241,808.5 | 0.970 | 0.980 |
| 2012-13 | 561,543.77 | 149,010.46 | 0.950 | 0.960 |
| 2011-12 | 388,563.49 | 159,182.79 | 0.910 | 0.900 |
| 2010-11 | 320,568.56 | 144,125.62 | 0.950 | 0.930 |

Tabla 9.2

Bagazo producido:

La cantidad de bagazo producido diario depende de la molienda, a continuación se muestra la cantidad de bagazo producido en las últimas 4 zafras.

| Zafra | Molienda de Caña | | Producción de Bagazo | |
|---------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| | Total Molienda (T.C) | Promedio por hora | Total producido (TB) | Promedio por hora (T.B) |
| 2013-14 | 848,084.59 | 185 TC | 228,983 | 49.95 T.B |
| 2012-13 | 710,554.23 | 180 TC | 206,061 | 52.2 T.B |
| 2011-12 | 547,746.28 | 176 TC | 147,891 | 47.25 T.B |
| 2010-11 | 464,694.18 | 155 TC | 130,114 | 43.4 T.B |

9.2 Poder Calorífico

El poder calorífico del bagazo depende de la calidad de la caña y del proceso de extracción del jugo de la caña, para poder evaluar las características del poder calorífico del Bagazo.

Según el informe diario del laboratorio químico de molienda, el bagazo procesado presenta las siguientes características:

| | |
|---------------------|-------|
| % bagazo en caña | 27 |
| % Fibra en caña | 13.44 |
| % Fibra en Bagazo | 44.64 |
| % Humedad en bagazo | 50.67 |
| % pol en bagazo | 3.82 |

Para determinar el poder calorífico utilizamos la siguiente ecuación, propuesta en el Manual para ingenios azucareros por Hugot,

$$PCIH = PCIS - 48.50 * W \quad (kcal/kg)$$

Dónde:

W; humedad del bagazo

PCIS: Poder de combustion seco

PCIS: 4250 (Kcal/Kg) para contenido de hidrogeno de 0.065

Resultando el valor de poder calorífico:

$$PCIH = 4250 - 48.50 * 50.67 \quad (kcal/kg)$$

$$PCIH = 1,792.505 \quad (Kcal/kg)$$

| | KJ/Kg | Kcal/Kg | Btu/lb |
|-------------|---------|-----------|-------------|
| PCIH Bagazo | 7,582.3 | 1,792.505 | 3,258.77409 |

9.3 Rendimiento de generación de vapor

El ciclo de generación de vapor actual, tiene un rendimiento de 4,350lbv/ton. Bagazo, consumiendo un total de 44.85 toneladas de bagazo para producir las 195,000 lbs de vapor de consumo.

Potencia disponible de materia prima será:

Potencia de bagazo: masa x Poder calorífico

Masa; 44.85 T.B = 98,670 lb/h de bagazo

Poder calorífico: 3,258.774 Btu/lb

Potencia disponible: 321,543,230.6 Btu/h

Potencia desarrollada por las calderas:

$$Qc.v = (1,204.246 \text{ Btu/lbm}) * (195,000 \text{ lbm/h}) = 234,827,970$$

La eficiencia de uso de bagazo:

$$\eta = \frac{\text{Potencia desarrollada por las calderas}}{\text{Potencia disponible de bagazo}} = \frac{234,827,970}{321,543,230.6} = 0.659$$

En la última zafra se almaceno un total de 21,200 toneladas de bagazo, las cuales significan 19.6 días de generación; 8,700 toneladas fueron utilizadas en el arranque de zafra, dejando un total de 12,500 toneladas desperdiciadas, puesto que el ingenio no es agente del mercado eléctrico nacional.

9.4 Aumento de producción de bagazo proyectado:

El aumento de producción de azúcar y molienda de caña significa un aumento en la producción de bagazo, estimando la molienda proyectada de 7,000 diarias toneladas para la zafra 15-16, se estima una disponibilidad de 87.5 toneladas de bagazo de caña por hora.

Estimando una producción de 357,000 toneladas de bagazo durante toda la zafra.

El cambio del tipo de molienda, genera un cambio en la humedad final del bagazo, puesto que este atravesaría 5 molinos en serie, lo que reduciría su nivel de humedad hasta un 48%, mejorando el poder calorífico del bagazo a un valor de:

$$PCIH = 4250 - 48.50 * 48 \quad (\text{kcal/kg})$$

$$PCIH = 1,922 \text{ (Kcal/Kg)}$$

| | KJ/Kg | Kcal/Kg | Btu/lb |
|-------------|----------|-----------|---------|
| PCIH Bagazo | 8,130.06 | 1,792.505 | 3,494.2 |

Potencia disponible por bagazo:

$$P = (192,500 \text{ lb/h de bagazo}) * (3,494.2 \text{ Btu/lb}) = 672,633,500.$$

La potencia disponible futura duplicaría la potencia actual del bagazo.

10. Análisis de ciclo termodinámico y tamaño de planta propuesta

10.1 Ciclo de Rankine tradicional:

Para evaluar la caldera a implementar y el ciclo termodinámico a implementar, se utilizó 3 valores de presión de funcionamiento de la caldera, para determinar la mayor eficiencia y capacidad de generación.

Los valores de presión utilizados son: 600 PSI, 900 PSI, 1250 PSI, debido a que son los valores de presión comunes de operación de las calderas implementadas en los ingenios Nicaragüense.

Los valores de temperatura máxima de vapor sobrecalentado, depende de la turbina implementada, en este caso se utilizaron las temperaturas de operación de turbinas de 10-50 MW de la marca Siemen, Toshiba y Mitsubishi con presión de trabajo de 600 PSI, 900 PSI, 1250 PSI.

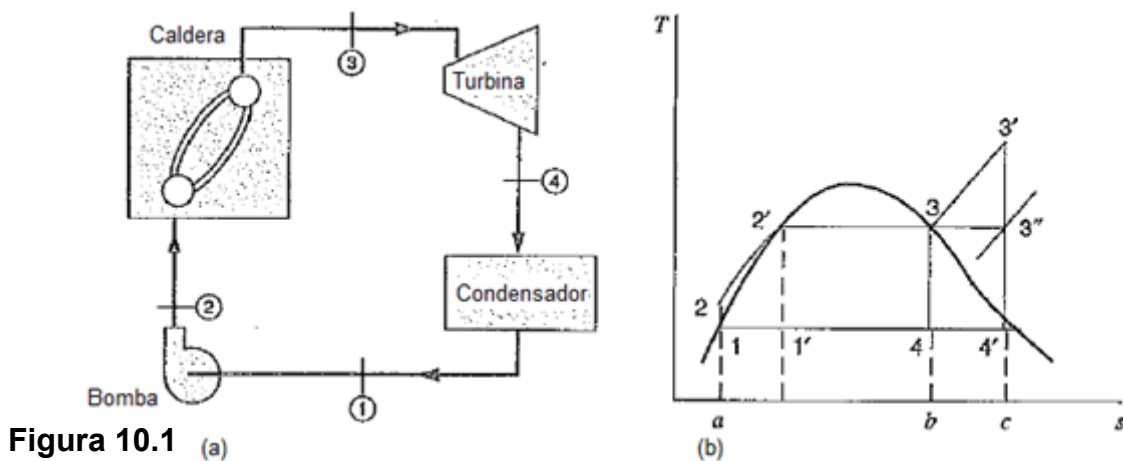
| Temperatura trabajo de las turbinas (°F) | Presión de caldera (PSI) |
|---|--------------------------|
| 698 °F | 600 |
| 842 °F | 900 |
| 950 °F | 1250 |

Tabla 10.1

Los ciclos termodinámicos evaluados son el ciclo de Rankine tradicional, ciclo con recalentador, y ciclo de Rankine regenerativo, para poder conocer la eficiencia del ciclo y salto entálpico, y proceder a proponer los valores de calderas y turbinas a implementar.

Ciclo de Rankine tradicional:

La siguiente figura muestra un ciclo de Rankine tradicional:



En la figura 8.2 a se muestran los elementos que componen un ciclo de Rankine tradicional, la figura B, muestra los valores de temperatura vs entropía del ciclo a presión constante.

Los valores de cada uno de los puntos mostrados en la figura 8.2 b representan las características de entrada y salida del vapor o líquido en cada uno de los elementos.

3' – 4': Entrada y salida de turbina respectivamente.

4' – 1: Entrada y salida de condensador.

1 – 2: Entrada y salida de Bomba de alimentación.

2- 3': Entrada y salida de la caldera.

10.1.1 Ciclo Rankine 600 PSI:

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 600 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado | 698 °F |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 8.2

Volumen de control: Turbina

$h_{3'}$ – Se busca valor de entalpía, de vapor sobrecalentado de 600 PSI a 698°F en las tablas de propiedades termodinámicas.

$h_{3'}$: 1349.4 btu/lbm

$S_{3'}$: 1.586 btu/lbm

$S_3 = S_4 = 1.586 \text{ btu/lbm}$ 1.27 PSI

Agua está en condiciones de saturación al salir de la turbina:

Calculamos la calidad $X_4 = (S_4 - S_f) / (S_{fg}) = (1.586 - 0.1473) / (1.8101) = 0.7948$

Calculamos la entalpía $h_4 = h_f + X h_{fg} = 78.01 + (0.7948) * (1031.28) = 897.69 \text{ btu/lbm}$

$W_T = (h_3 - h_4) = (1349.4 - 897.69) = (451.711 \text{ btu/lbm})$

Volumen de control: Bomba

h_1 = entalpía de agua saturada a 1.27 PSI ; h_1 = 78.01 Btu/lbm

$$w_P = h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP$$

$$h_2 - h_1 = (0.01617) * (600 - 1.27) * (144/778) = 1.791$$

$$h_2 = 78.01 + 1.791 = 79.8 \text{ btu/lbm}$$

Volumen de control: Caldera

$$q_c = (h_3 - h_2) = (1349.4 - 79.8) = 1,269.6 \text{ btu/lbm}$$

eficiencia:

$$n = (451.711 \text{ btu/lbm} - 1.791 \text{ btu/lbm}) / 1,296.6 \text{ btu/lbm} = 0.3543$$

Resumen características de vapor de ciclo 1

| Características de ciclo | Valor |
|---------------------------------------|-----------------|
| h_1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h_2 (entalpía entrada de caldera) | 79.8 btu/lbm |
| h_3' (entalpía entrada turbina) | 1349.4 btu/lbm |
| h_4' (entalpía entrada condensador) | 896.67 btu/lbm |
| W_t (trabajo de turbina) | 451.11 btu/lbm |
| W_p (trabajo de bomba) | 1.791 btu/lbm |
| Q_c (calor de calderas) | 12669.6 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.3543 |

Tabla 10.3

10.1.2 Ciclo Rankine 900 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión caldera | 900 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado | 842 °F |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.4

Al repetir el procedimiento de cálculo realizado en el ciclo # 1, obtenemos los siguientes datos:

Resumen características de vapor de ciclo # 2

| Características de ciclo | Valor |
|------------------------------------|-----------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 80.7 btu/lbm |
| h3'(entalpía entrada turbina) | 1417.91 btu/lbm |
| h4' (entalpia entrada condensador) | 905.6 btu/lbm |
| Wt (trabajo de turbina) | 511.31 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba) | 2.6898 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1337.21 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.38237 |

Tabla 10.5

10.1.3 Ciclo Rankine 1250 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión caldera | 1250 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado | 950 °F |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.6

Resumen características de vapor de ciclo # 3

| Características de ciclo | Valor |
|------------------------------------|------------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 81.747 btu/lbm |
| h3'(entalpía entrada turbina) | 1466.715 btu/lbm |
| h4' (entalpia entrada condensador) | 903.034 btu/lbm |
| Wt (trabajo de turbina) | 563.68 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba) | 3.737 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1384.95 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.406 |

Tabla 10.7

10.2 Ciclo de Rankine con recalentador:

Se evaluó las características del ciclo termodinámico, si se implementa un recalentador, esto consiste en reducir el salto entálpico de una turbina, para poder recalentar el vapor y poder accionar una turbina adicional de baja presión.

La siguiente figura muestra un ciclo de Rankine con recalentador:

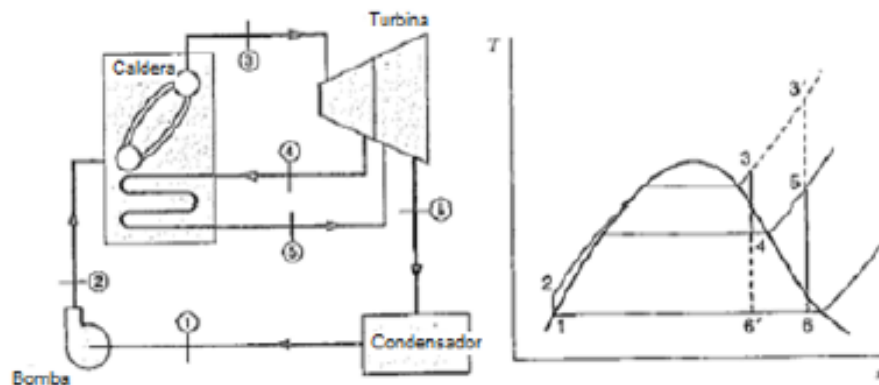


Figura 10.2

En la figura se observa el aumento de temperatura los puntos 4, 5, 7 que son el resultado del uso de un recalentador.

10.2.1 Ciclo Rankine con recalentador 600 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 600 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 698 °F |
| Presión de entrada de generador de baja presión | 60 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.8

Volumen de control:

$$W_T = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

h_3 - Entalpía de vapor sobre-calentado a 698°F y 600 PSI

$$h_3 = 1349.4 \text{ btu/lbm}$$

$$S_3 = 1.586 \text{ btu/lbm} \quad S_3 = S_4$$

En el punto 4 se encuentra en condicione de saturación, calculamos la calidad

$$X = (S_4 - S_f) / (S_{fg}) = 0.952$$

$$h_4 = h_f + x h_{fg} = 262.12 + (0.9552 \cdot 915.85) = 1132.174 \text{ but/lbm}$$

h5- se buscó en tabla de propiedades termograficas del agua, a 60 PSI, a 698°F,

$$h_5 = 1380.384 \text{ btu/lbm} \quad S_5 = 1.86 \text{ btu/lbm}$$

$$S_5 = S_6$$

$$S_6 = 0.1473 - (X \cdot 1.8101) \quad X = 0.946$$

$$h_6 = (78.01 + 0.946 \cdot 1031.28) = 1,053.8 \text{ Btu/lbm}$$

$$WT = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

$$WT = (1349.4 - 1132.174) + (1380.384 - 1053.8) = 543.81 \text{ Btu/lbm}$$

Volumen de control: Bomba

h1- a presión de 1.27 PSI, se obtiene um valor de agua saturada

$$W_p = v(P_2 - P_1) = (0.01617)(600 - 1.27)(144/778) = 1.792 \text{ btu/lbm}$$

$$h_2 = (h_1 + 1.792) = 79.802 \text{ btu/lbm}$$

Volumen de control: Caldera

$$q_c = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = (1349.4 - 79.802) + (1380.384 - 1132.174) = 1571.81 \text{ btu/lbm}$$

$$\text{Eficiencia} = (543.81 - 1.792) / 1517.81 = 0.357$$

10.2.2Ciclo con recalentador de 900 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 900 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 842 °F |
| Presión de entrada de generador de baja presión | 150 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.9

Características de ciclo con recalentador y 900 PSI

| Características de ciclo | Valor |
|--|-----------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 80.692 btu/lbm |
| h3'(entalpía entrada turbina) | 1417.91 btu/lbm |
| h4' (entalpia salida primera turbina) | 903.034 btu/lbm |
| h5 (entrada de vapor turbina de 150 PSI) | 1448.99 btu/lbm |
| H6 (entalpia entrada de condensador) | 1028.39 |
| Wt (trabajo de turbina) | 619.6 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba) | 2.689 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1,566.7 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.395 |

Tabla 10.10

10.2.3Ciclo con recalentador de 1250 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 1250 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 950 °F |
| Presión de entrada de generador de baja presión | 200 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.11

Características de ciclo con recalentador y 1250 PSI

| Características de ciclo | Valor |
|--|------------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 81.75 btu/lbm |
| h3'(entalpía entrada turbina) | 1466.715 btu/lbm |
| h4' (entalpia salida primera turbina) | 1246.52 btu/lbm |
| h5 (entrada de vapor turbina de 150 PSI) | 1503.16 btu/lbm |
| H6 (entalpia entrada de condensador) | 1033.3btu/lbm |
| Wt (trabajo de turbina) | 689.3368 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba) | 3.74 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1,641.6 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.4176 |

Tabla 10.12

10.3 Ciclo de Rankine Regenerativo:

Este ciclo consiste en colocar un pre-calentador alimentado de parte del vapor proveniente de la turbina, disminuyendo levemente la potencia de generación y aumentando la eficiencia de la caldera.

La figura 8.3 muestra los componentes del ciclo regenerativo y la gráfica temperatura Vs entropía,

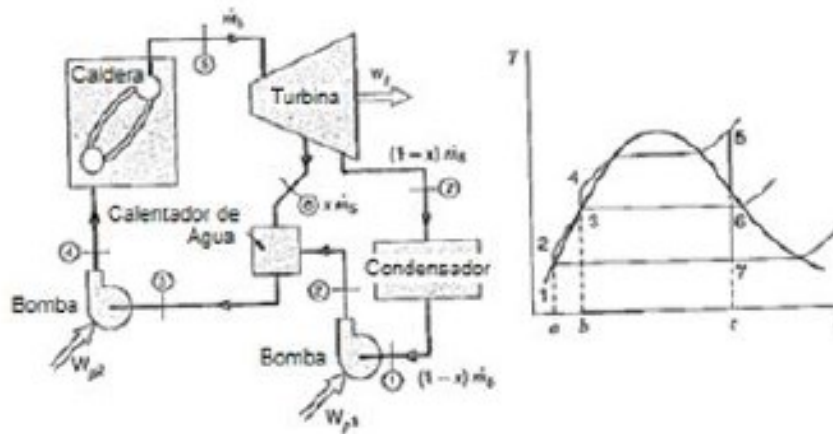


Figura 10.3

A continuación evaluaremos las características de vapor con los 3 valores de presión antes utilizados:

10.3.1 Ciclo regenerativo de 600 PSI

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 600 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 698 °F |
| Presión de extracción de vapor en turbina | 60 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.13

De los ejercicios anteriores tenemos

h1- entalpía de punto de líquido saturado a 1.27PSI h1: 78.01btu/lbm

h5- vapor sobrecalentado a 600 PSI y 698°F h5=1349.4 btu/lbm

h6-Condiciones de saturación en extracción de vapor al turbo 1132.7 btu/lbm

h7-Condiciones de saturación 897.69

Bomba de baja presión

$$W_p = h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1) = 0.01617 (600 - 1.27)(144/778) = 0.1697 \text{ btu/lbm}$$

$$h_2 = 78.01 + 0.1697 = 78.1797 \text{ btu/lbm}$$

Turbina

$$W_T = (h_5 - h_6) + (1 - X)(h_6 - h_7)$$

Se calcula X :

$$X = (h_3 - h_2) / (h_6 - h_2)$$

Para encontrar h3:

buscamos entalpia en liquido saturado. $h_f = 262.1167 \text{ btu/lbm}$

$$X = 0.1737$$

$$W_T = (1349.4 - 1132.174) + (1 - 0.1737)(1132.174 - 867.69)$$

$$W_T = 435.76 \text{ btu/lbm}$$

Bomba de alta presión:

$$W_p = 0.01735(600 - 60)(144/778) = 1.7405 \text{ btu/lbm}$$

$$h_4 = h_3 + W_p = 263.86 \text{ btu/lbm}$$

Caldera:

$$q_c = h_5 - h_4 = (1349.4 - 263.86) \text{ Btu/lb}$$

$$q_c = 1085.53 \text{ btu/lbm}$$

$$\text{eficiencia} = (W_{\text{net}}) / (435.76 / 1085.53) = 0.4014$$

Resumen de ciclo evaluado:

| Características de ciclo | Valor |
|-------------------------------------|------------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 81.75 btu/lbm |
| h3' (entalpía entrada segun bomba) | 1466.715 btu/lbm |
| h4' (entalpia salida segunda Bomba) | 262.1167 btu/lbm |
| h5 (entrada de vapor turbina) | 1349.4 btu/lbm |
| H6 (entalpia extracción de vapor) | 1132.174btu/lbm |
| H7 (Entalpia condensador) | 897.69 btu/lbm |
| X (flujo de liquido) | 0.1737 |
| Wt (trabajo de turbina) | 435.76 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba) | 0.1697 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba #2) | 1.7405 |
| Qc (calor de calderas) | 1,085.53 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.4014 |

Tabla 10.14

10.3.2 Ciclo regenerativo 900 PSI evaluado:

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 900 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 842 °F |
| Presión de extracción de vapor en turbina | 150 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.15

Características del ciclo:

| Características de ciclo | Valor |
|---------------------------------------|------------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 78.455 btu/lbm |
| h3' (entalpía entrada segun bomba) | 330.67 btu/lbm |
| h4' (entalpia salida segunda Bomba) | 333.098 btu/lbm |
| h5 (entrada de vapor turbina) | 1417.91 btu/lbm |
| H6 (entalpia extracción de vapor) | 1219.5 btu/lbm |
| H7 (Entalpia condensador) | 897.69 btu/lbm |
| X (flujo de liquido) | 0.221 |
| Wt (trabajo de turbina) | 449.1 tu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba baja presión) | 0.445 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba de alta presión) | 2.4279 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1,084.81 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.414 |

Tabla 10.16

10.3.3 Ciclo regenerativo 1250 PSI evaluado:

| Datos de ciclo | |
|---|----------|
| Presión de caldera | 1250 PSI |
| Temperatura máxima vapor sobrecalentado turbina de alta presión | 950 °F |
| Presión de extracción de vapor en turbina | 200 PSI |
| Presión condensador | 1.27 PSI |
| Temperatura de condensador | 110 °F |

Tabla 10.17

Características de ciclo 1250 PSI:

| Características de ciclo | Valor |
|---------------------------------------|-------------------|
| h1 (entalpía entrada de bomba) | 78.01 btu/lbm |
| h2 (entalpía entrada de caldera) | 78.605 btu/lbm |
| h3'(entalpía entrada segun bomba) | 355.53 btu/lbm |
| h4' (entalpia salida segunda Bomba) | 359.142 btu/lbm |
| h5 (entrada de vapor turbina) | 1466.715 btu/lbm |
| H6 (entalpia extracción de vapor) | 1246.52 btu/lbm |
| H7 (Entalpia condensador) | 897.69 btu/lbm |
| X (flujo de líquido) | 0.2371 |
| Wt (trabajo de turbina) | 486.3371 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba baja presión) | 0.59478 btu/lbm |
| Wp (trabajo de bomba de alta presión) | 3.612 btu/lbm |
| Qc (calor de calderas) | 1,107.573 btu/lbm |
| N (eficiencia) | 0.4388 |

Tabla 10.18

Resumen de Rendimiento de ciclos termodinámicos:

| Tipo de ciclo | Presión | Wt (Btu/lbm) | Eficiencia |
|------------------------------|-----------------------|--------------|------------|
| Ciclo tradicional de rankine | Tradicional 600 PSI | 451.11 | 0.354 |
| | Tradicional 900 PSI | 511.31 | 0.382 |
| | Tradicional 1250 PSI | 563.68 | 0.406 |
| Ciclo con recalentador | Recalentador 600 PSI | 543.81 | 0.357 |
| | Recalentador 900 PSI | 619.60 | 0.395 |
| | Recalentador 1250 PSI | 689.34 | 0.418 |
| Ciclo regenerativo | Regenerativo 600 PSI | 435.76 | 0.404 |
| | Regenerativo 900 PSI | 449.10 | 0.414 |
| | Regenerativo 1250 PSI | 486.34 | 0.439 |

Tabla 10.19

La tabla muestra el comportamiento de todos los ciclos evaluados, donde podemos observar los valores de salto entálpico y eficiencia del ciclo termodinámico, es notable que en un ciclo de mayor presión hay un mayor rendimiento.

Además se observa que el ciclo con mayor salto entálpico es el ciclo con recalentador, pero el más eficiente es el ciclo regenerativo, para el caso del Ingenio escogemos el ciclo regenerativo de 1250 PSI, puesto que la caldera tendrá un mayor rendimiento de consumo de vapor.

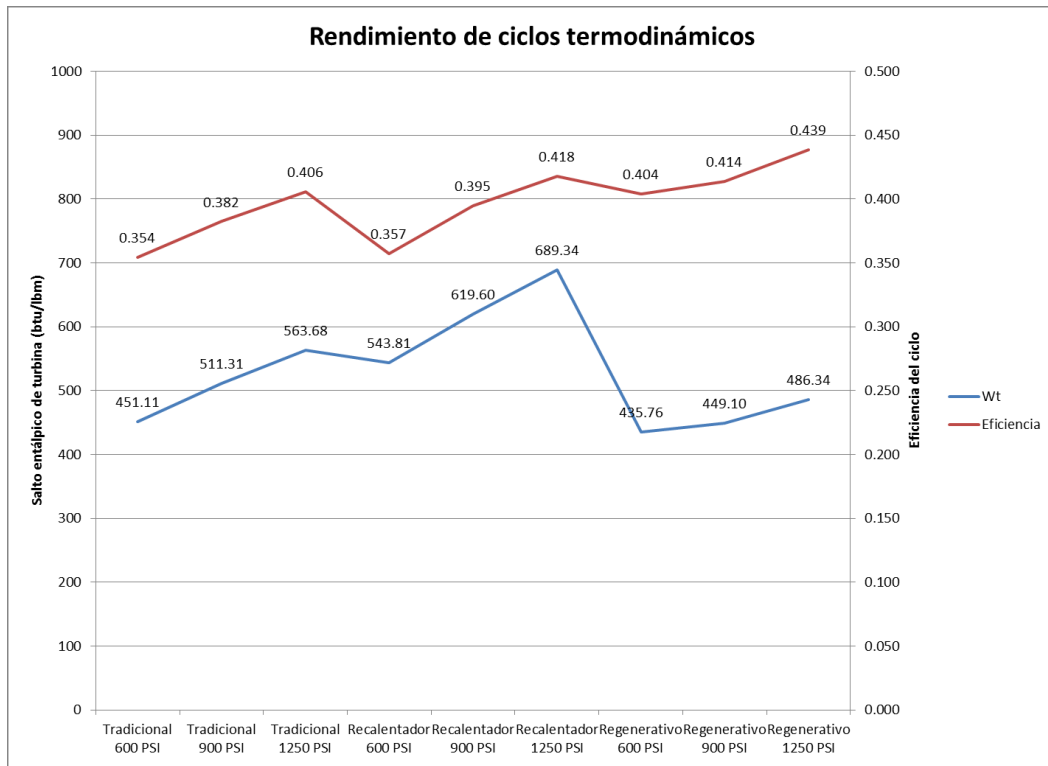


Figura 10.4

En la gráfica se observa el comportamiento de alta eficiencia del ciclo regenerativo, con la desventaja que reduce el salto entálpico puesto que se extrae vapor de la turbina para aumentar la eficiencia del ciclo.

En el caso del ciclo con recalentador observamos que tiene un alto salto entálpico, siendo una ventaja para aumentar la potencia generada, pero con una eficiencia baja.

10.4 Tamaño propuesto de planta

Las demandas actuales y futuras a satisfacer se presentan en la siguiente tabla:

| Tipo de demanda | Actual | Demanda Insatisfecha | Capacidad disponible | Futura |
|--------------------------|--------------|----------------------|----------------------|--|
| Demanda máxima eléctrica | 4,315.8 KW | 349.5 KW | 4 MW | 11,248 KW |
| Demanda de vapor | 187,000 lb/h | 73,000 lb/h | 195,000 lb/h | 110,000lb+demanda de turbogeneradores. |

Tabla 10.20

Rendimiento de materia prima

| | Capacidad actual de producción de bagazo | Producción de bagazo futura |
|-------------------------|--|-----------------------------|
| Toneladas por cada hora | 49.95 | 87.5 |
| Toneladas | 228.983 | 357,000 |

Tabla 10.21

El tamaño de la demanda los definiremos en dependencia de la materia prima disponible, y el rendimiento del ciclo termodinámico seleccionado.

La disponibilidad de bagazo producido será de 87.5 toneladas por cada hora, es necesario almacenar el 5%, para utilizar este bagazo al activar el sistema eléctrico. Por esto la producción destinada para generación inmediata será 83.1 toneladas de bagazo, los rendimientos de la calderas de 1250 PSI con ciclo regenerativo varían desde 3,200 lb/ton de bagazo, hasta 3,700lb/ton.

Existe la capacidad de generar 265,920 lbs/h de vapor, el valor comercial próximo es de 260,000lbs/h de vapor, con rendimiento de 3,400 lb/ton de bagazo.

Para disponer de 2 unidades generadoras, tenemos 2 unidades de 15 MW de 1250 PSI con consumo de 125,000 lbs de vapor.El consumo de vapor de fabricación será satisfecho por el vapor de salida de las turbinas, siendo un consumo total de 250,000 lbs de vapor.

El tamaño de la planta es capaz de satisfacer en este caso, la demanda eléctrica y la demanda de vapor de fabricación, dejando además un excedente de energía bastante alto, generando la necesidad de ser agente del mercado eléctrico Nacional.

10.4.1 Características de planta Propuestas:

| Características de ciclo termodinámico | | Características de generadores | |
|--|---------------|--------------------------------|---------------|
| Presión de caldera | 1250 PSI | Potencia | 2 x 15MW |
| Flujo total generado | 260,000 lbs/h | Turbina | |
| Tipo de ciclo | Regenerativo | Temperatura de turbo | 950°F |
| X (extracción de flujo) | 0.2371 | Flujo de turbo | 125,000 lbs/h |
| Extracción de flujo | | Potencia de turbo | 15 MW |
| Presión de extracción | 200 PSI | | |
| Bombeo de baja presión | 50 kw | | |
| Bombeo de alta presión | 265 kw | | |
| eficiencia | 0.4388 | | |

Tabla 10.22

10.4.2 Explotación de la planta:

La 8.23 presenta los valores de rendimiento de la planta estimados para la zafra 15-16, al aumentar a la potencia actual a la propuesta.

Los factores de reservas e Instalación son referidos al consumo del Ingenio.

| Rendimiento de planta estimado | | | |
|------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| Potencia Instalada | 37 MW | | |
| Potencia media generada | 30 MW | | |
| Potencia conectada de Ingenio | 14.06 MW | Energía total a generar | 122,400 MWH |
| Demanda máxima estimada de Ingenio | 12 MW | Días estimados de funcionamiento | 170 |
| Venta de potencia estimada | 18 MW | Reserva de bagazo | 28,850 ton |
| Energía diaria generada | 720 MWH | Factor de uso de planta | 0.8 |
| Energía diaria de venta | 280 MWH | | |
| F. Reserva | 2.5 | | |
| F. Instalación | 2.64 | | |
| Bagazo consumido diario | 1,925.9 ton | | |
| rendimiento | 373 Kw/T.B | | |

Tabla 10.23

11. Potencia disponible para venta de energía

Potencia disponible para venta:

En la planta propuesta existe la capacidad de vender el excedente producido, que equivale a un mínimo disponible de 18 MW.

Al considerar el factor de carga de 0.88 de demanda del ingenio, se tiene una potencia promedio de 20 MW disponible para venta, con un estimado de 81,600MWH de energía disponible para venta en período de zafra.

En período post-zafra existe una reserva de 28,850 toneladas de bagazo, que son equivalentes a 10,761 MWH, la distribución de los días de funcionamiento post-zafra se debe establecer en dependencia de la capacidad de la subestación disponible a instalar.

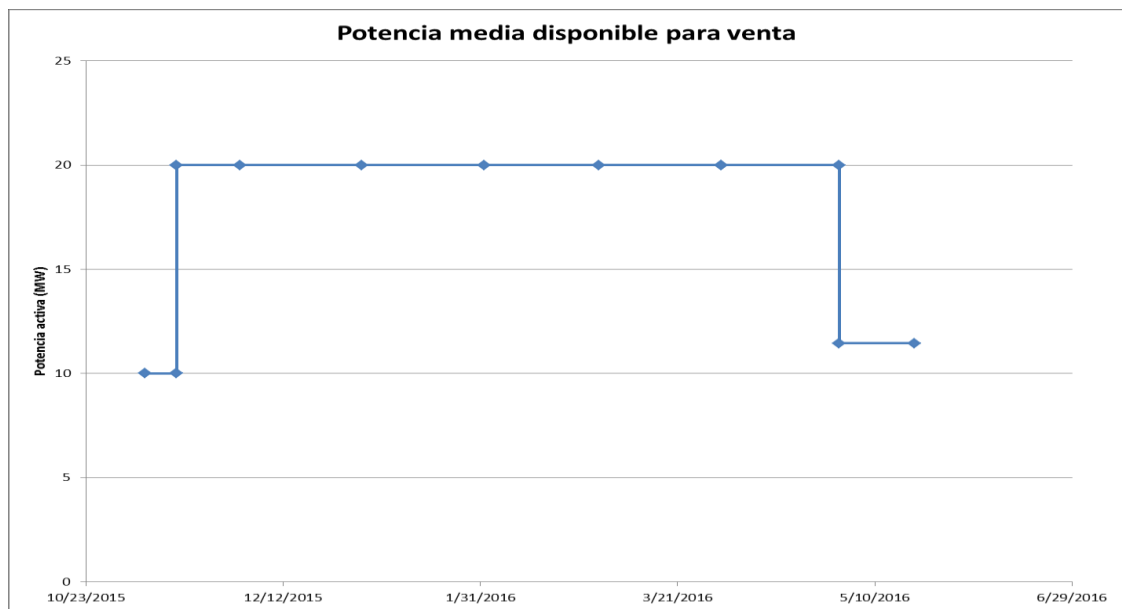
La subestación deberá tener capacidad de soportar el punto de venta máximo en período de zafra.

Por esto conviene utilizar un solo generador al terminar la zafra, para definir la capacidad de la subestación con las potencias de venta en periodos de zafra.

Estableciendo el trabajo de un solo generador al finalizar los meses de producción, con la energía disponible de 10,761 MWH se tiene 30 días de generación, se deben reducir al menos 7 días para poder reservar bagazo para el arranque de la zafra siguiente.

| | Período de zafra | Período pos-zafra |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| Potencia media generada | 20 MW | 15 MW |
| Potencia Mínima disponible | 18 MW | - |
| Días de generación estimados | 170 | 30 |
| Energía disponible | 81,600 MWH | 10,800 MWH |

Es necesario construir una subestación de transmisión para conectar el sistema eléctrico del Ingenio al SIN mediante la subestación de Rivas, además de línea de transmisión a 138 KV, con un dimensionamiento mayor a 20 MW, puesto que es la potencia entregada por el sistema durante toda la zafra



Limitaciones técnicas para ser Agente de mercado eléctrico

En el mercado mayorista de electricidad se compra y vende, potencia y energía. Estos se comercializan por medio de Mercado de Contratos y/o por el Mercado de Ocasión.

Mercado de Contratos:

Pueden ser acordados para comprar potencia y energía, o solamente para la potencia o la energía. Las cantidades de potencia o de energía contratadas por día, por hora o por la estación pueden variar.

En el caso del Ingenio, es necesario definir el tiempo de producción de energía dependiente del tiempo de producción de azúcar, que equivalen a 7 meses de funcionamiento de la planta, los meses siguientes el ingenio es una demanda alta al sistema.

Los valores de potencia promedio de venta fueron definidos en el valor de potencia disponible de venta.

12. Cálculo de VAN

Costos de Inversión:

Caldera y central de generación

La Instalación de una caldera de 1250 PSI con la capacidad de 250 klb/h, tiene costo de 7,750,000 USD, obtenido de cotización de la empresa IBL (Industrial Boiler LTD).

Instalación de 2 turbogeneradores: 5,200,000 USD, obtenidos de unidades siemens de generación.

Precio de energía:

El precio monómico de la energía dependerá del contrato de venta realizado, en los ingenios azucareros San Antonio y Monte Rosa se define de la siguiente manera:

$$PE = CE_n \times EG$$

PE=pago por energía generada

CE_n = Precio de energía en año "n".

EG= Energía generada.

$$CE_n = CE_{n-1} \times 1.03$$

CE_{n-1} = Precio de energía en año anterior a "n".

Para el año $CE_{2015} = 0.11473$ USD/kwh.

El precio máximo de contratos es de: 0.13986 USD/kwh.

Costos energéticos de operación de planta:

El consumo estimado de energía de consumo propio en el análisis de demanda máxima eléctrica es de 2,466 kw, y la promedio es de 2,192.3, al proyectar un total de 170 días de producción, tendremos un consumo de 8,944,477.92 kwh.

| Costo de energía consumida | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Zafra | Precio de venta de energía (\$/kwh) | Costo de energia (\$) |
| 15-16 | 0.11473 | 1,026,199.95 |
| 16-17 | 0.11817 | 1,056,985.95 |
| 17-18 | 0.12172 | 1,088,695.53 |
| 18-19 | 0.12537 | 1,121,356.39 |
| 19-20 | 0.12913 | 1,154,997.09 |

Energía disponible de venta:

La energía disponible de venta es de 92,400 MWH por zafra, a continuación se muestra tabla con los ingresos a obtener por venta de energía en las próximas 5 zafras

| Ingresos por energía vendida | | |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Zafra | Precio de venta de energía (\$/kwh) | Costo de energía (\$) |
| 15-16 | 0.11473 | 10,601,052.00 |
| 16-17 | 0.11817 | 10,919,083.56 |
| 17-18 | 0.12172 | 11,246,656.07 |
| 18-19 | 0.12537 | 11,584,055.75 |
| 19-20 | 0.12913 | 11,931,577.42 |

Estimación de VAN:

| Flujo efectivo USD | | | | | | |
|--------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Inversión total | 12,950,000 | | | | | |
| Período | | Zafra 15-16 | Zafra 16-17 | Zafra 17-18 | Zafra 18 - 19 | Zafra 19-20 |
| Ingresos | | 10,601,052 | 10,919,084 | 11,246,656 | 11,584,056 | 11,931,577 |
| Costos de energía | | 1,026,199.95 | 1,056,985.95 | 1,088,695.53 | 1,121,356.39 | 1,154,997.09 |
| Depreciación | | 1,295,000.00 | 1,295,000.00 | 1,295,000.00 | 1,295,000.00 | 1,295,000.00 |
| Valor de rescate | | | | | | 6,475,000.00 |
| Flujo efectivo | -12,950,000 | 8,279,852 | 8,567,098 | 8,862,961 | 9,167,699 | 15,956,580 |
| TMAR | 10% | | | | | |
| VAN | 24,485,701 | | | | | |
| TIR | 63% | | | | | |

13. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. La potencia de generación actual no satisface la demanda de energía eléctrica y de vapor del Ingenio Benjamín Zeledón, siendo la principal causa la baja capacidad de generación de vapor.

Las demandas insatisfechas actuales son las siguientes:

Demanda de potencia consumida a la red de distribución eléctrica:
275.85 KW promedio.

Demanda de vapor: 73,000 lb/h.

El bajo rendimiento de la caldera y baja capacidad de generación producen desperdicio del bagazo producido, en la última zafra se estimó una pérdida de 12,500 toneladas de bagazo, equivalentes a 12 días de generación en período de zafra.

La propuesta de tamaño de planta y explotación de la misma se definió mediante la disponibilidad de bagazo, estimado con el nuevo proceso de molienda y el aumento de áreas cultivadas.

Al tener una capacidad de generación promedio de 30 MW, con 250,000 lbs de vapor, suficiente para cubrir la demanda actual y futura proyectada con 10,000 toneladas de caña molida diaria del ingenio Benjamín Zeledón actual y aprovechar la producción total de bagazo.

2. Con la capacidad de generación propuesta, es necesario ser agente de mercado eléctrico, puesto que se cuenta con un alto excedente de generación de energía, estimado en 92,400 MWH para venta
Dividido como se muestra en la siguiente tabla:

| | Período de zafra | Período pos-zafra |
|--------------------|------------------|-------------------|
| Energía disponible | 81,600 MWH | 10,800 MWH |

Para ello es necesario la construcción de una subestación y realizar contrato de venta de potencia o energía a la red de transmisión por período mínimo de 8 meses.

3. Se evaluó 3 tipos de ciclo termodinámicos, con diferentes valores de presión de trabajo, resultando el más eficiente el ciclo regenerativo con 1250 PSI, este ciclo fue considerado en la propuesta de tamaño de planta realizada.

Recomendaciones:

Se debe realizar un análisis económico para conocer la viabilidad de la propuesta de tamaño de la planta, y realizar una propuesta rentable y eficiente.

Para poder evaluar la rentabilidad también es necesario incluir el diseño y construcción de la subestación a construir para conectar al sistema Interconectado Nacional para vender el excedente de energía producido.

Se debe evaluar los incentivos legales existentes que incentiva el crecimiento de generación renovable, puesto que se brindan muchos beneficios por ser generación de energía con Biomasa.

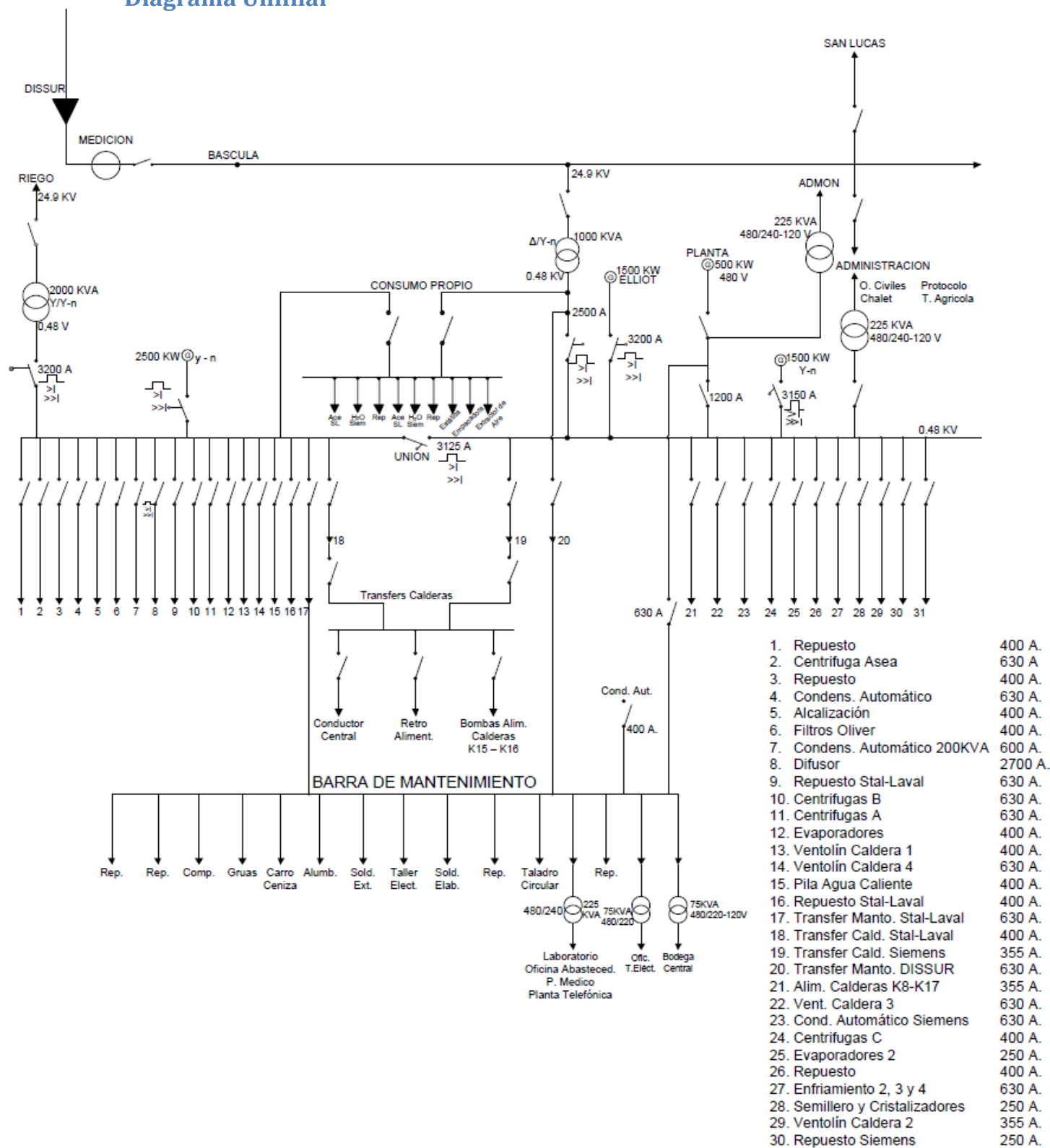
Convertirse en agente de mercado eléctrico llevará múltiples condicionamientos legales que deben ser evaluados, puesto es necesario realizar contrato por la energía a vender.

13. Bibliografía:

- [1] Sonntag, Van Wylen (2003), Fundamentos de termodinámica, Sexta edición. John Wiley & sons.**
- [2] Kolanowski, Bernard (2003), Small-Scale cogeneration Handbook, Segunda Edición, The fairmont Press, Inc and Marcel Dekker, Inc.**
- [3] Maza Ortega, Jiménez Calle, Martínez Ramos, Mora García (2006), Optimización del funcionamiento de planta de cogeneración para su inclusión en el mercado eléctrico. Publicación del departamento de Ingeniería eléctrica de la universidad de Sevilla.**
- [4] Oliveira Jr., Pellegrini, Plantas de cogeneración con caña de azúcar (2010), Publicación del Departamento de Ingeniería Mecánica de Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo, São Paulo (Brasil).**
- [5] Van Den Brock, R. (1998). Electricidad a partir de bagazo de caña y eucalipto en los ingenios azucareros de Nicaragua. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/x2351s/x2351s03.htm#TopOfPage>**
- [6] Hugot E. (1963). Manual para ingenios azucareros. CECSA. México**
- [7] Ricardo Barrios V. (2015). Informe anual CNPA . Susaeta ediciones (Nicaragua).**

Anexos

Diagrama Unifilar



INFORME DIARIO DE PRODUCCION

| DATOS DE MOLINDA | | | | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA | DATOS DE PRODUCCION | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|-----------------|----------|------------|---|-----------|-----------------|----------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------|--------|------------|
| Toneladas Caña Molida | | | | 633,006.92 | 4,347.38 | 701,366.87 | AZUCAR | | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA | | | | |
| Horas Molindo | | | | 3,446.93 | 22.750 | 3,641.921 | Quintales Azúcar Físico Sulfitada | | 1094,898.06 | 5,754.01 | 967,173.45 | | | | |
| Horas Perdidas | | | | 561.07 | 1.250 | 366.079 | Quintales Azúcar Físico Crudo | | 214,079.67 | 524.03 | 305,275.81 | | | | |
| % Tiempo Perdido | | | | 14.00 | 5.21 | 9.13 | Quintales Azúcar Físico Total | | 1308,977.72 | 6,278.04 | 1272,449.26 | | | | |
| T.C. Molida/ Horas Efectivas | | | | 183.64 | 191.09 | 192.58 | Quintales Azúcar Base %96 Total | | 1357,649.17 | 6,512.97 | 1318,098.50 | | | | |
| T.C. Molida/ Horas Zafra | | | | 157.94 | 181.14 | 174.99 | Sacos 50 Kilogramos Azúcar Físico Sulfitada | | 993,285.00 | 5,220.00 | 877,414.00 | | | | |
| Molienda Potencial | | | | 4,407.45 | 4,586.25 | 4,621.96 | Sacos 50 Kilogramos Azúcar Crudo | | 194,211.80 | 475.40 | 276,944.40 | | | | |
| Molienda / Día Zafra | | | | 3,790.46 | 4,347.38 | 4,199.80 | TOTAL SACOS DE 50 KILOGRAMOS. | | 1187,496.80 | 5,695.40 | 1154,358.40 | | | | |
| Imbibición % Caña | | | | 27.81 | 22.98 | 25.93 | Quintales de azúcar en proceso | | 10,573.03 | 102.03 | 14,107.11 | | | | |
| Jugo Diluido % Caña | | | | 99.81 | 92.87 | 98.13 | MELAZA | | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA | | | | |
| Dilución % Caña | | | | 18.40 | 16.61 | 18.62 | Toneladas Cortas Miel Final Física | | 21,962.05 | 170.44 | 20,789.56 | | | | |
| % Solidos Insolubles Jugo Diluido | | | | 1.29 | 3.36 | 2.32 | Toneladas Métricas Miel Final Física | | 19,923.84 | 154.62 | 18,860.16 | | | | |
| % Extracción Molino #1 | | | | 72.00 | 69.89 | 72.19 | Galones Miel Final / T.C. | | 6.25 | 7.54 | 5.14 | | | | |
| Ext. J.A.E. % Caña | | | | 81.41 | 76.26 | 79.51 | Toneladas Cortas Miel Final en Proceso | | 513.77 | 19.95 | 337.97 | | | | |
| Extracción Sacarosa % Sacarosa Caña | | | | 93.44 | 88.50 | 91.40 | ENERGIA | | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA | | | | |
| Extracción Reducida 12.5 Fibra | | | | 93.43 | 89.42 | 91.38 | Producción Stal Laval (MW) | | 6,129.44 | 41.60 | 6,467.30 | | | | |
| No Azúcares % Caña | | | | 2.21 | 2.76 | 2.02 | Producción Siemens (MW) | | 3,698.98 | 0.00 | 3,107.58 | | | | |
| Bagazo % Caña | | | | 28.00 | 30.11 | 27.80 | Producción General Electric (MW) | | 6,032.10 | 0.00 | 2,020.70 | | | | |
| Cachaza % Caña | | | | 1.98 | 1.14 | 1.42 | Producción Whorthington (MW) | | 0.00 | 37.20 | 2,622.50 | | | | |
| Fibra % Caña | | | | 12.48 | 13.44 | 12.47 | PRODUCCIÓN TOTAL (MW) | | 15,860.52 | 78.80 | 14,218.08 | | | | |
| % Fibra en Bagazo | | | | 44.58 | 44.64 | 44.84 | Compra a la Red (MW) | | 27.37 | 0.00 | 20.16 | | | | |
| % Humedad en Bagazo | | | | 51.56 | 50.16 | 50.62 | Consumo de Fábrica (MW) | | 12,929.07 | 76.16 | 12,062.41 | | | | |
| % Pol Cachaza | | | | 0.93 | 0.74 | 0.82 | Consumo de Fábrica (KWh/ton) | | 20.42 | 17.52 | 17.20 | | | | |
| % Pol Bagazo | | | | 3.06 | 3.82 | 3.56 | Consumo de Riego (MW) | | 2,670.49 | 0.00 | 1,793.16 | | | | |
| % Pol Caña | | | | 13.05 | 9.99 | 11.50 | Consumo de Auxiliares (MW) | | 288.32 | 2.64 | 382.61 | | | | |
| Toneladas Caña Ingreso | | | | 633,257.06 | 4,285.24 | 701,810.47 | CONSUMO TOTAL (MW) | | 15,887.89 | 78.80 | 14,238.18 | | | | |
| Toneladas Caña Stock Patio | | | | | 443.60 | | Consumo de Vapor (Lbs) | | 634850.188 | 3759.292 | 658862.450 | | | | |
| JUGOS | | | | BRIX | %SAC. | PUREZA | P.H. | %AZ. RED. | %CENIZAS | PIE %TC | INDICES DE EFICIENCIA | | | | |
| J. Primario Hoy | | | | 16.64 | 13.12 | 78.77 | 5.19 | 1.92 | 0.39 | | | RENDIMIENTOS | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA |
| J. Primario H. F. | | | | 16.17 | 13.95 | 86.26 | 5.28 | 0.90 | 0.30 | | | Rto. Físico Lbs/TC | 208.46 | 146.76 | 183.44 |
| J. Diluido Hoy | | | | 12.50 | 9.52 | 76.20 | 5.41 | 1.68 | 0.40 | | | Rto. Base 96 Lbs/TC | 216.21 | 152.25 | 190.02 |
| J. Diluido H. F. | | | | 12.77 | 10.71 | 83.88 | 5.55 | 0.85 | 0.30 | | | BAL. POL %CAÑA | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA |
| J. Residual Hoy | | | | 10.99 | 8.06 | 73.32 | | | | | | Miel Final | 1.29 | 1.33 | 0.95 |
| J. Residual H. F. | | | | 8.60 | 6.75 | 78.44 | | | | | | Bagazo | 0.86 | 1.15 | 0.99 |
| J. Clarif. Hoy | | | | 12.63 | 9.72 | 76.96 | 6.62 | 1.59 | 0.40 | | | Cachaza | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| J. Clarif. H. F. | | | | 12.57 | 10.63 | 84.54 | 6.70 | 0.78 | 0.32 | | | Indeterminada | 0.51 | 0.20 | 0.43 |
| J. Filtrado Hoy | | | | 11.70 | 8.07 | 68.91 | 6.29 | | | | | Recobrado | 10.38 | 7.31 | 9.12 |
| J. Filtrado H. F. | | | | 10.08 | 7.72 | 76.61 | 6.43 | | | | | Pol Caña | 13.05 | 9.99 | 11.50 |
| J. Difusor Hoy | | | | 11.28 | 8.38 | 74.28 | 6.16 | | | | | Pérdidas Fábrica | 1.82 | 1.54 | 1.39 |
| J. Difusor H. F. | | | | 11.09 | 9.10 | 82.04 | 5.96 | | | | | Pérdidas Totales | 2.67 | 2.69 | 2.38 |
| Meladura Hoy | | | | 65.73 | 52.26 | 79.49 | 6.24 | 5.09 | 1.73 | | | RECObRADO | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA |
| Meladura H. F. | | | | 62.14 | 53.32 | 85.81 | 6.50 | 3.57 | 1.59 | | | % Recobrado | 79.52 | 73.13 | 79.30 |
| Mel. Clarif. Hoy | | | | 62.70 | 50.08 | 79.84 | 6.18 | 4.56 | 1.53 | | | LBS PERDIDAS | META | HOY | A LA FECHA |
| Mel. Clarif. H. F. | | | | 60.10 | 51.51 | 85.70 | 6.39 | 3.36 | 1.52 | | | Miel Final | 18.10 | 26.56 | 19.06 |
| Masa A Hoy | | | | 91.20 | 76.68 | 84.08 | | | | 2.01 | | Bagazo | 15.56 | 22.98 | 19.77 |
| Masa A H. F. | | | | 91.15 | 79.88 | 87.63 | | | | 2.92 | | Cachaza | 0.41 | 0.17 | 0.23 |
| Miel A Hoy | | | | 76.49 | 53.24 | 69.61 | | | | | | Indeterminada | 7.11 | 4.00 | 8.55 |
| Miel A H. F. | | | | 75.63 | 55.81 | 73.80 | | | | | | Pérdidas Totales | 41.18 | 53.70 | 47.62 |
| Masa B Hoy | | | | 93.01 | 66.45 | 71.45 | | | | 1.60 | | INDICE DE PROD.QUIM. | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA |
| Masa B H. F. | | | | 93.17 | 68.67 | 73.71 | | | | 2.00 | | Cal Lb/TC | 2.43 | 2.94 | 2.63 |
| Miel B Hoy | | | | 73.79 | 36.34 | 49.27 | | | | | | Azufre Lb/TC | 0.25 | 0.30 | 0.22 |
| Miel B H. F. | | | | 75.35 | 38.38 | 50.93 | | | | | | Floculante Lb/TC | 0.008 | 0.009 | 0.008 |
| Masa C Hoy | | | | 97.25 | 56.29 | 57.88 | | | | 1.09 | | Floculante Mel.Lb/TC | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| Masa C H. F. | | | | 97.51 | 56.13 | 57.56 | | | | 1.15 | | Ac. Fosf. Lb/TC | 0.040 | 0.008 | 0.021 |
| Miel R Hoy | | | | | | | | | | | | Bactericida Lb/TC | 0.026 | 0.029 | 0.022 |
| Miel R H. F. | | | | 73.12 | 57.48 | 78.61 | | | | | | Polic. Alum. Lb/TC | 0.020 | 0.023 | 0.016 |
| Magma B Hoy | | | | 90.30 | 86.05 | 95.29 | | | | | | Pensoactivo Lb/TC | 0.011 | 0.016 | 0.008 |
| Magma B H. F. | | | | 91.27 | 86.49 | 94.76 | | | | | | Premezcla Vit."A" gr/Kg | 0.737 | 0.766 | 0.713 |
| Magma C Hoy | | | | 92.44 | 81.11 | 87.75 | | | | | | DESGL0SE % T.P. | HF ZAFRA 12 -13 | HOY | A LA FECHA |
| Magma C H. F. | | | | 92.59 | 79.01 | 85.33 | | | | | | % T.P. F.C./Corte Man. | 0.00 | 0.00 | 0.07 |
| Miel Final Hoy | | | | 88.61 | 29.21 | 32.96 | | 30.88 | 12.47 | | | % T.P. F.C./Corte Mec. | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Miel Final H. F. | | | | 87.36 | 30.74 | 35.19 | | 18.56 | 16.08 | | | % T.P. F. C./Cargue | 0.00 | 0.00 | 0.05 |
| C.Cal. Masa C | | | | 91.52 | 26.96 | 29.46 | | | | | | % T.P. F. C./Transporte | 0.02 | 0.00 | 0.31 |
| C.Frio Crist. #8 | | | | 87.76 | 26.96 | 30.72 | | | | | | % T.P. F. C./Otras Caus. | 0.04 | 0.00 | 0.14 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Extracción | 3.01 | 2.08 | 2.83 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Fabricación | 1.69 | 0.00 | 0.35 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Electrico | 0.65 | 0.00 | 0.16 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Calderas | 6.33 | 3.13 | 4.05 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Instrumentación | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Dep. Mecánico | 0.23 | 0.00 | 0.06 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Limp. y Mant. | 1.89 | 0.00 | 1.02 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Fuera Control | 0.07 | 0.00 | 0.08 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Lluvia | 0.05 | 0.00 | 0.02 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. Feriado | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | | | | | | | | | | | | % T.P. TOTAL | 14.00 | 5.21 | 9.13 |
| | | | | | | | | | | | | OBSERVACIONES | | | |
| | | | | | | | | | | | | Nota: 101.14 tn caña corte macanudo | | | |
| | | | | | | | | | | | | 606.27 QQ de azúcar para | | | |
| | | | | | | | | | | | | COMPAÑIA AZUCARERA DEL SUR S.A. | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle Benigno C. | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | | | | | | | | | Calle 12 de Octubre | | | |
| | | | | </ | | | | | | | | | | | |

Informe de laboratorio

VERIFICADO POR
COMITE NACIONAL DE PRODUCTORES DE AZUCAR



Datos de producción total de zafra



DATOS FINALES DE PRODUCCIÓN ZAFRA 2010/11

CIFRAS EN
QUINTALES

| CONCEPTO | UM | SAN ANTONIO | MONTE ROSA | B. ZELEDON | MONTE LIMAR | TOTAL NACIONAL |
|--|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| AREA COSECHADA | | | | | | |
| Propio | Mzs. | 21,882.00 | 18,221.14 | 6,279.18 | 6,090.29 | 48,422.61 |
| Colonos | Mzs. | 18,824.00 | 12,680.68 | 2,862.11 | 11.88 | 28,717.97 |
| TOTAL EN MANZANAS | Mzs. | 86,868.00 | 28,761.87 | 7,881.29 | 6,101.82 | 77,140.68 |
| CAÑA MOLIDA | | | | | | |
| Propio | T.C. | 1,611,493.00 | 1,149,100.49 | 320,568.56 | 344,534.50 | 3,425,696.55 |
| Colonos | T.C. | 760,776.00 | 796,843.67 | 144,125.62 | 760.70 | 1,702,505.99 |
| TOTAL T.C. | T.C. | 2,372,269.00 | 1,945,944.16 | 464,694.18 | 345,295.20 | 5,128,202.54 |
| RENDIMIENTO AGRICOLA | | | | | | |
| Propio | T.C./Mz. | 73.81 | 70.84 | 60.72 | 67.68 | 70.75 |
| Colonos | T.C./Mz. | 55.03 | 63.59 | 61.28 | 67.14 | 59.28 |
| REND. AGRICOLA TOTAL | T.C./Mz. | 66.53 | 67.68 | 60.89 | 67.68 | 66.48 |
| PRODUCCIÓN DE AZÚCAR (EN QUINTALES) | | | | | | |
| REFINADA | Qqs. | 1,302,191.00 | - | - | - | 1,302,191.00 |
| SULFITADA | Qqs. | 829,252.00 | 2,744,604.64 | 795,859.50 | 729,827.76 | 5,099,543.90 |
| CRUDA | Qqs. | 2,852,114.00 | 1,301,007.37 | 210,967.87 | - | 4,364,089.24 |
| PRODUCCIÓN TOTAL (FISICO) | Qqs. | 4,983,557.00 | 4,045,612.01 | 1,006,827.37 | 729,827.76 | 10,765,824.14 |
| PRODUC. TOTAL (BASE 96°) | Qqs. | 5,152,963.00 | 4,193,921.17 | 1,042,463.89 | 756,588.11 | 11,145,936.17 |
| Rend. Industrial (Físico) | Lbs/T.C. | 210.08 | 207.90 | 216.66 | 211.36 | 209.93 |
| Rend. Industrial (Base 96°) | Lbs/T.C. | 217.22 | 215.52 | 224.33 | 219.11 | 217.35 |
| Generación | (KWH) | 170,670,698.00 | 152,155,770.00 | 8,911,930.00 | - | 331,738,398.00 |
| Generación | (KWH/TM) | 79.30 | 86.66 | 21.14 | 21.27 | - |
| KWH a consumir en fábrica | | 73,283,202.00 | 44,852,370.00 | 8,772,530.00 | - | 126,908,102.00 |
| Energía a vender a DISNORTE | | 76,616,895.00 | 103,666,400.00 | - | - | 180,283,296.00 |
| Energía hacia riego | | 15,470,311.00 | #1REF1 | 150,770.00 | #1REF1 | - |
| Venta Total energía | | 97,387,496.00 | 103,666,400.00 | - | - | 201,053,896.00 |
| MELAZA | | | | | | |
| * Producción | T.M. | 76,434.00 | 62,673.16 | 14,400.57 | 12,622.24 | 166,129.97 |
| * Ventas Internas | T.M. | 59,150.00 | - | 1,752.59 | 2,298.12 | 63,200.71 |
| TIEMPO PERDIDO | | | | | | |
| Tiempo perdido | (Horas) | 1,040.98 | 294.08 | 881.33 | 389.93 | 2,606.32 |
| Tiempo perdido | (%) | 13.57 | 8.45 | 22.47 | 10.48 | - |
| Porcentaje de Participac. | % | 46.23 | 37.6274 | 9.3529 | 6.7880 | 100.00 |
| DÍAS DE ZAFRA: | | 175.00 | 144.00 | 163.00 | 154.00 | 187 |
| Fecha inicio | | 06-nov-10 | 25-nov-10 | 30-nov-10 | 24-nov-10 | 6-NOV-2010 |
| Fecha finalización | | 30-abr-11 | 18-abr-11 | 12-may-11 | 27-abr-11 | 12-MAY-2011 |
| MONTE ROSA: Se incluye 142,895.27 qqs. azúcar equivalente | | | | | | |

CIFRAS EN
QUINTALES

COMITÉ NACIONAL DE PRODUCTORES DE AZUCAR
DATOS FINALES DE PRODUCCIÓN - ZAFRA 2011/12

| CONCEPTO | U/M | SAN ANTONIO | MONTE ROSA | B. ZELEDON | MONTE LIMAR | TOTAL NACIONAL |
|--|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| AREA COSECHADA | | | | | | |
| Propio | Mzs. | 22,571.68 | 17,818.20 | 6,082.69 | 5,008.79 | 51,481.36 |
| Colonos | Mzs. | 15,211.06 | 15,535.07 | 2,582.19 | 98.80 | 33,422.11 |
| TOTAL EN MANZANAS | Mzs. | 37,782.68 | 33,348.27 | 8,664.88 | 5,097.59 | 84,873.42 |
| CANA MOLIDA | | | | | | |
| Propio | T.C. | 1,888,337.45 | 1,418,366.69 | 388,563.49 | 330,040.35 | 4,025,307.97 |
| Colonos | T.C. | 944,943.19 | 1,098,493.79 | 159,182.79 | 6,574.87 | 2,209,194.64 |
| TOTAL T.C. | T.C. | 2,833,280.64 | 2,516,860.48 | 547,746.28 | 336,615.22 | 6,234,502.62 |
| RENDIMIENTO AGRICOLA | | | | | | |
| Propio | T.C./Mz. | 83.68 | 79.62 | 64.09 | 65.96 | 78.24 |
| Colonos | T.C./Mz. | 62.12 | 70.71 | 61.65 | 70.09 | 66.10 |
| REND. AGRICOLA TOTAL | T.C./Mz. | 74.99 | 75.47 | 63.36 | 66.03 | 73.46 |
| PRODUCCIÓN DE AZÚCAR (EN QUINTALES) | | | | | | |
| REFINADA | QQs. | 1,898,236.00 | - | - | - | 1,898,236.00 |
| SULFITADA | QQs. | 575,759.00 | 3,138,202.23 | 1,034,085.27 | 702,268.47 | 5,448,314.97 |
| CRUDA | QQs. | 3,333,540.00 | 2,216,650.34 | 158,291.82 | - | 5,708,482.16 |
| PRODUCCIÓN TOTAL (FÍSICO) | QQs. | 5,807,535.00 | 5,352,852.57 | 1,192,377.09 | 702,268.47 | 13,055,033.13 |
| PRODUC. TOTAL (BASE 96°) | QQs. | 6,007,529.66 | 5,575,888.10 | 1,236,875.36 | 728,457.23 | 13,548,750.35 |
| Rend. Industrial (Físico) | Lbs/T.C. | 204.98 | 212.68 | 217.69 | 208.63 | 209.40 |
| Rend. Industrial (Base 96°) | Lbs/T.C. | 212.03 | 221.54 | 225.81 | 216.41 | 217.32 |
| Generación | (KWH) | 196,467,449.00 | 213,000,000 | 11,811,450 | 6,634,686 | 427,913,584.99 |
| Generación | (KWH/TM) | 76.95 | 93.09 | 23.77 | 21.73 | - |
| KWH consumidos en fábrica | | 81,116,798.00 | 68,000,000 | 11,072,580 | 5,795,983 | 165,985,360.99 |
| Energía vendida a DISNORTE | | 89,878,648 | 145,000,000 | - | - | 234,878,648 |
| Energía hacia riego | | 16,144,626 | - | 845,770 | 838,703 | 17,829,099 |
| Venta Total energía | | 115,263,551 | 145,000,000 | - | - | 260,263,551 |
| M E L A Z A | | | | | | |
| * Producción | T.M. | 90,526.00 | 87,936.13 | 15,331.70 | 12,149.49 | 205,943.32 |
| * Ventas Internas | T.M. | 90,526.00 | 41,910.00 | 8,607.26 | - | 141,043.26 |
| TIEMPO PERDIDO | | | | | | |
| Tiempo perdido | (Horas) | 1,019.89 | 346.95 | 746.48 | 467.73 | 2,581.05 |
| Tiempo perdido | (%) | 12.43 | 8.21 | 19.32 | 12.60 | - |
| DIAS DE ZAFRA: | | 177.00 | 175.00 | 160.00 | 154.68 | 188 |
| Fecha inicio | | 09-nov-11 | 22-nov-11 | 30-nov-11 | 22-nov-11 | 9-NOV-2011 |
| Fecha finalización | | 04-may-12 | 15-may-12 | 08-may-12 | 26-abr-12 | 15-MAY-2012 |

CIFRAS EN
QUINTALES

COMITÉ NACIONAL DE PRODUCTORES DE AZUCAR
DATOS FINALES DE PRODUCCIÓN - ZAFRA 2012/13

| CONCEPTO | U/M | SAN ANTONIO | MONTE ROSA | B. ZELEDON | MONTE LIMAR | TOTAL NACIONAL |
|--|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| AREA COSECHADA | | | | | | |
| Propio | Mzs. | 26,610.68 | 18,072.99 | 7,418.84 | 7,602.99 | 58,706.60 |
| Colonos | Mzs. | 17,166.21 | 17,076.40 | 2,236.72 | 1,148.29 | 37,611.62 |
| TOTAL EN MANZANAS | Mzs. | 42,766.89 | 35,148.39 | 9,655.56 | 8,746.28 | 96,317.12 |
| CANA MOLIDA | | | | | | |
| Propio | T.C. | 2,083,965.41 | 1,530,877.38 | 561,543.77 | 547,409.93 | 4,723,796.49 |
| Colonos | T.C. | 1,131,521.28 | 1,338,293.88 | 149,010.46 | 73,800.78 | 2,692,626.40 |
| TOTAL T.C. | T.C. | 3,215,486.69 | 2,869,171.26 | 710,554.23 | 621,210.71 | 7,416,422.89 |
| RENDIMIENTO AGRICOLA | | | | | | |
| Propio | T.C./Mz. | 81.37 | 84.71 | 75.69 | 72.00 | 80.47 |
| Colonos | T.C./Mz. | 65.95 | 78.38 | 66.62 | 64.55 | 71.59 |
| REND. AGRICOLA TOTAL | T.C./Mz. | 75.19 | 81.63 | 73.59 | 71.03 | 77.00 |
| PRODUCCION DE AZUCAR (EN QUINTALES) | | | | | | |
| REFINADA | QQs. | 2,075,877.00 | - | - | - | 2,075,877.00 |
| SULFITADA | QQs. | 141,012.00 | 3,282,297.77 | 1,214,376.35 | 766,728.91 | 5,404,415.03 |
| CRUDA | QQs. | 4,252,237.00 | 2,395,860.97 | 234,255.95 | 399,327.43 | 7,281,681.34 |
| HTM AZUCAR EQUIVALENTE | QQs. | 22,071.00 | 366,914.95 | | | 388,985.95 |
| PRODUCCION TOTAL (FISICO) | QQs. | 6,491,197.00 | 6,045,073.68 | 1,448,632.30 | 1,166,056.34 | 15,150,959.32 |
| PRODUC. TOTAL (BASE 96°) | QQs. | 6,701,240.00 | 6,272,471.83 | 1,502,453.98 | 1,204,246.09 | 15,680,411.89 |
| Rend. Industrial (Físico) | Lbs/T.C. | 201.87 | 210.69 | 203.87 | 187.71 | 204.29 |
| Rend. Industrial (Base 96°) | Lbs/T.C. | 208.41 | 218.62 | 211.45 | 193.85 | 211.43 |
| Generación | (KWH) | 208,798,297.00 | 204,899,465.00 | 17,973,320.00 | 11,330,883.35 | 443,001,965.35 |
| Generación | (KWH/TM) | 71.58 | 78.56 | 27.88 | 20.11 | |
| KWH consumidos en fábrica | | 89,256,456.00 | 69,780,080.00 | 14,862,060.00 | 11,330,883.35 | 185,229,479.35 |
| Energía vendida a DISNORTE | | 88,603,323.00 | 134,802,553.00 | | | 223,405,876.00 |
| Energía hacia riego | | 20,052,890.00 | | 2,804,280.00 | | 22,857,170.00 |
| Venta Total energía | | 119,541,841.00 | 169,802,553.00 | | | 289,344,394.00 |
| M E L A Z A | | | | | | |
| * Producción | T.M. | 107,767.00 | 105,740.84 | 22,838.58 | 26,310.75 | 262,657.17 |
| * Ventas Internas | T.M. | 86,868.00 | 1,257.83 | 5,838.58 | - | 93,964.21 |
| TIEMPO PERDIDO | | | | | | |
| Tiempo perdido | (Horas) | 675.98 | 288.02 | 744.49 | 570.42 | 2,278.91 |
| Tiempo perdido | (%) | 15.35 | 6.49 | 16.17 | 13.52 | |
| DIAS DE ZAFRA: | | 187.00 | 185.00 | 194.00 | 177.00 | 195 |
| Fecha inicio | | 12-nov-12 | 13-nov-12 | 13-nov-12 | 28-nov-12 | 12-NOV-2012 |
| Fecha finalización | | 18-may-13 | 17-may-13 | 26-may-13 | 24-may-13 | 26-MAY-2013 |

CIFRAS EN
QUINTALES

COMITÉ NACIONAL DE PRODUCTORES DE AZÚCAR
DATOS FINALES DE PRODUCCIÓN - ZAFRA 2013/14

| CONCEPTO | UM | SAN ANTONIO | MONTE ROSA | B. ZELEDON | MONTE LIMAR | TOTAL NACIONAL |
|--|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| AREA COSECHADA | | | | | | |
| Propio | Mzs. | 26,081.88 | 18,857.47 | 7,516.82 | 7,788.98 | 68,668.96 |
| Colonos | Mzs. | 18,697.48 | 19,038.99 | 8,844.85 | 1,471.82 | 42,647.46 |
| TOTAL EN MANZANAS | Mza. | 48,729.36 | 37,891.46 | 10,860.27 | 9,260.80 | 101,216.39 |
| CANA MOLIDA | | | | | | |
| Propio | T.C. | 1,941,248.80 | 1,555,875.51 | 806,278.09 | 587,914.25 | 4,691,112.45 |
| Colonos | T.C. | 1,228,559.80 | 1,445,042.01 | 241,808.50 | 106,966.73 | 3,022,377.05 |
| TOTAL T.C. | T.C. | 3,169,808.60 | 3,000,717.53 | 848,086.59 | 694,880.98 | 7,713,489.50 |
| RENDIMIENTO AGRICOLA | | | | | | |
| Propio | T.C./Mz. | 77.55 | 84.74 | 80.67 | 75.72 | 79.96 |
| Colonos | T.C./Mz. | 65.71 | 75.92 | 72.30 | 72.70 | 71.04 |
| REND. AGRICOLA TOTAL | T.C./Mz. | 72.49 | 80.25 | 78.09 | 75.24 | 76.21 |
| PRODUCCION DE AZUCAR (EN QUINTALES) | | | | | | |
| REFINADA | QQs. | 1,874,259.00 | - | - | - | 1,874,259.00 |
| SULFITADA | QQs. | 239,386.00 | 3,416,520.78 | 1,049,260.83 | 1,070,239.39 | 5,775,406.80 |
| CRUDA | QQs. | 4,744,445.00 | 2,003,484.13 | 441,800.56 | 268,766.11 | 7,458,275.80 |
| HTM AZUCAR EQUIVALENTE | QQs. | 9,819.00 | 723,851.35 | | | 733,470.35 |
| PRODUCCION TOTAL (FISICO) | QQs. | 6,867,709.00 | 6,143,836.26 | 1,490,861.19 | 1,339,005.50 | 15,841,411.95 |
| PRODUC. TOTAL (BASE 96°) | QQs. | 7,077,866.29 | 6,399,829.44 | 1,543,598.76 | 1,377,876.80 | 16,399,171.29 |
| Rend. Industrial (Físico) | Lbs/T.C. | 216.86 | 204.75 | 175.79 | 192.70 | 205.37 |
| Rend. Industrial (Base 96°) | Lbs/T.C. | 223.29 | 213.28 | 182.01 | 198.29 | 212.60 |
| Generación | (KWH) | 216,490,510.00 | 257,999,650.00 | 16,973,940.00 | 11,781,893.97 | 503,245,993.97 |
| Generación | (KWH/TM) | 75.28 | 94.78 | 22.06 | 18.69 | |
| KWH consumidos en fábrica | | 88,287,255.00 | 80,960,120.00 | 14,514,710.00 | 11,781,893.97 | 195,543,978.97 |
| Energía vendida a DISNORTE | | 100,706,251.00 | 177,039,530.00 | | | 277,745,781.00 |
| Energía hacia riego | | 27,547,610.00 | | 2,029,420.00 | | 29,577,030.00 |
| Venta Total energía | | 128,253,861.00 | 177,039,530.00 | | | 305,293,391.00 |
| M E L A Z A | | | | | | |
| * Producción | T.M. | 119,062.00 | 107,768.00 | 23,647.94 | 32,465.80 | 282,943.74 |
| * Ventas Internas | T.M. | 109,590.00 | - | 3,647.94 | - | 113,237.94 |
| TIEMPO PERDIDO | | | | | | |
| Tiempo perdido | (Horas) | 999.80 | 253.00 | 429.33 | 498.21 | 2,180.34 |
| Tiempo perdido | (%) | 12.22 | 5.72 | 8.95 | 11.35 | |
| DIAS DE ZAFRA: | | 173.00 | 183.00 | 199.00 | 182.00 | 200 |
| Fecha inicio | | 14-nov-13 | 16-nov-13 | 15-nov-13 | 25-nov-13 | 14-NOV-2013 |
| Fecha finalización | | 06-may-14 | 18-may-14 | 02-jun-14 | 26-may-14 | 02-JUN-2014 |

Tabla de propiedades termodinámicas del agua

TABLE B.1
Thermodynamic Properties of Water

TABLE B.1.1
Saturated Water

| Temp. (°C) | Press. (kPa) | SPECIFIC VOLUME, m ³ /kg | | | INTERNAL ENERGY, kJ/kg | | |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid v_f | Evap. v_{fg} | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Evap. u_{fg} | Sat. Vapor u_g |
| 0.01 | 0.6113 | 0.001000 | 206.131 | 206.132 | 0 | 2375.33 | 2375.33 |
| 5 | 0.8721 | 0.001000 | 147.117 | 147.118 | 20.97 | 2361.27 | 2382.24 |
| 10 | 1.2276 | 0.001000 | 106.376 | 106.377 | 41.99 | 2347.16 | 2389.15 |
| 15 | 1.705 | 0.001001 | 77.924 | 77.925 | 62.98 | 2333.06 | 2396.04 |
| 20 | 2.339 | 0.001002 | 57.7887 | 57.7897 | 83.94 | 2318.98 | 2402.91 |
| 25 | 3.169 | 0.001003 | 43.3583 | 43.3593 | 104.86 | 2304.90 | 2409.76 |
| 30 | 4.246 | 0.001004 | 32.8922 | 32.8932 | 125.77 | 2290.81 | 2416.58 |
| 35 | 5.628 | 0.001006 | 25.2148 | 25.2158 | 146.65 | 2276.71 | 2423.36 |
| 40 | 7.384 | 0.001008 | 19.5219 | 19.5229 | 167.53 | 2262.57 | 2430.11 |
| 45 | 9.593 | 0.001010 | 15.2571 | 15.2581 | 188.41 | 2248.40 | 2436.81 |
| 50 | 12.350 | 0.001012 | 12.0308 | 12.0318 | 209.30 | 2234.17 | 2443.47 |
| 55 | 15.758 | 0.001015 | 9.56734 | 9.56835 | 230.19 | 2219.89 | 2450.08 |
| 60 | 19.941 | 0.001017 | 7.66969 | 7.67071 | 251.09 | 2205.54 | 2456.63 |
| 65 | 25.03 | 0.001020 | 6.19554 | 6.19656 | 272.00 | 2191.12 | 2463.12 |
| 70 | 31.19 | 0.001023 | 5.04114 | 5.04217 | 292.93 | 2176.62 | 2469.55 |
| 75 | 38.58 | 0.001026 | 4.13021 | 4.13123 | 313.87 | 2162.03 | 2475.91 |
| 80 | 47.39 | 0.001029 | 3.40612 | 3.40715 | 334.84 | 2147.36 | 2482.19 |
| 85 | 57.83 | 0.001032 | 2.82654 | 2.82757 | 355.82 | 2132.58 | 2488.40 |
| 90 | 70.14 | 0.001036 | 2.35953 | 2.36056 | 376.82 | 2117.70 | 2494.52 |
| 95 | 84.55 | 0.001040 | 1.98082 | 1.98186 | 397.86 | 2102.70 | 2500.56 |
| 100 | 101.3 | 0.001044 | 1.67185 | 1.67290 | 418.91 | 2087.58 | 2506.50 |
| 105 | 120.8 | 0.001047 | 1.41831 | 1.41936 | 440.00 | 2072.34 | 2512.34 |
| 110 | 143.3 | 0.001052 | 1.20909 | 1.21014 | 461.12 | 2056.96 | 2518.09 |
| 115 | 169.1 | 0.001056 | 1.03552 | 1.03658 | 482.28 | 2041.44 | 2523.72 |
| 120 | 198.5 | 0.001060 | 0.89080 | 0.89186 | 503.48 | 2025.76 | 2529.24 |
| 125 | 232.1 | 0.001065 | 0.76953 | 0.77059 | 524.72 | 2009.91 | 2534.63 |
| 130 | 270.1 | 0.001070 | 0.66744 | 0.66850 | 546.00 | 1993.90 | 2539.90 |
| 135 | 313.0 | 0.001075 | 0.58110 | 0.58217 | 567.34 | 1977.69 | 2545.03 |
| 140 | 361.3 | 0.001080 | 0.50777 | 0.50885 | 588.72 | 1961.30 | 2550.02 |
| 145 | 415.4 | 0.001085 | 0.44524 | 0.44632 | 610.16 | 1944.69 | 2554.86 |
| 150 | 475.9 | 0.001090 | 0.39169 | 0.39278 | 631.66 | 1927.87 | 2559.54 |
| 155 | 543.1 | 0.001096 | 0.34566 | 0.34676 | 653.23 | 1910.82 | 2564.04 |
| 160 | 617.8 | 0.001102 | 0.30596 | 0.30706 | 674.85 | 1893.52 | 2568.37 |
| 165 | 700.5 | 0.001108 | 0.27158 | 0.27269 | 696.55 | 1875.97 | 2572.51 |
| 170 | 791.7 | 0.001114 | 0.24171 | 0.24283 | 718.31 | 1858.14 | 2576.46 |
| 175 | 892.0 | 0.001121 | 0.21568 | 0.21680 | 740.16 | 1840.03 | 2580.19 |
| 180 | 1002.2 | 0.001127 | 0.19292 | 0.19405 | 762.08 | 1821.62 | 2583.70 |
| 185 | 1122.7 | 0.001134 | 0.17295 | 0.17409 | 784.08 | 1802.90 | 2586.98 |
| 190 | 1254.4 | 0.001141 | 0.15539 | 0.15654 | 806.17 | 1783.84 | 2590.01 |

TABLE B.1.1 (continued)
Saturated Water

| Temp. (°C) | Press. (kPa) | ENTHALPY, kJ/kg | | | ENTROPY, kJ/kg·K | | |
|---------------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Evap. s_{fg} | Sat. Vapor s_g |
| 0.01 | 0.6113 | 0.00 | 2501.35 | 2501.35 | 0 | 9.1562 | 9.1562 |
| 5 | 0.8721 | 20.98 | 2489.57 | 2510.54 | 0.0761 | 8.9496 | 9.0257 |
| 10 | 1.2276 | 41.99 | 2477.75 | 2519.74 | 0.1510 | 8.7498 | 8.9007 |
| 15 | 1.705 | 62.98 | 2465.93 | 2528.91 | 0.2245 | 8.5569 | 8.7813 |
| 20 | 2.339 | 83.94 | 2454.12 | 2538.06 | 0.2966 | 8.3706 | 8.6671 |
| 25 | 3.169 | 104.87 | 2442.30 | 2547.17 | 0.3673 | 8.1905 | 8.5579 |
| 30 | 4.246 | 125.77 | 2430.48 | 2556.25 | 0.4369 | 8.0164 | 8.4533 |
| 35 | 5.628 | 146.66 | 2418.62 | 2565.28 | 0.5052 | 7.8478 | 8.3530 |
| 40 | 7.384 | 167.54 | 2406.72 | 2574.26 | 0.5724 | 7.6845 | 8.2569 |
| 45 | 9.593 | 188.42 | 2394.77 | 2583.19 | 0.6386 | 7.5261 | 8.1647 |
| 50 | 12.350 | 209.31 | 2382.75 | 2592.06 | 0.7037 | 7.3725 | 8.0762 |
| 55 | 15.758 | 230.20 | 2370.66 | 2600.86 | 0.7679 | 7.2234 | 7.9912 |
| 60 | 19.941 | 251.11 | 2358.48 | 2609.59 | 0.8311 | 7.0784 | 7.9095 |
| 65 | 25.03 | 272.03 | 2346.21 | 2618.24 | 0.8934 | 6.9375 | 7.8309 |
| 70 | 31.19 | 292.96 | 2333.85 | 2626.80 | 0.9548 | 6.8004 | 7.7552 |
| 75 | 38.58 | 313.91 | 2321.37 | 2635.28 | 1.0154 | 6.6670 | 7.6824 |
| 80 | 47.39 | 334.88 | 2308.77 | 2643.66 | 1.0752 | 6.5369 | 7.6121 |
| 85 | 57.83 | 355.88 | 2296.05 | 2651.93 | 1.1342 | 6.4102 | 7.5444 |
| 90 | 70.14 | 376.90 | 2283.19 | 2660.09 | 1.1924 | 6.2866 | 7.4790 |
| 95 | 84.55 | 397.94 | 2270.19 | 2668.13 | 1.2500 | 6.1659 | 7.4158 |
| 100 | 101.3 | 419.02 | 2257.03 | 2676.05 | 1.3068 | 6.0480 | 7.3548 |
| 105 | 120.8 | 440.13 | 2243.70 | 2683.83 | 1.3629 | 5.9328 | 7.2958 |
| 110 | 143.3 | 461.27 | 2230.20 | 2691.47 | 1.4184 | 5.8202 | 7.2386 |
| 115 | 169.1 | 482.46 | 2216.50 | 2698.96 | 1.4733 | 5.7100 | 7.1832 |
| 120 | 198.5 | 503.69 | 2202.61 | 2706.30 | 1.5275 | 5.6020 | 7.1295 |
| 125 | 232.1 | 524.96 | 2188.50 | 2713.46 | 1.5812 | 5.4962 | 7.0774 |
| 130 | 270.1 | 546.29 | 2174.16 | 2720.46 | 1.6343 | 5.3925 | 7.0269 |
| 135 | 313.0 | 567.67 | 2159.59 | 2727.26 | 1.6869 | 5.2907 | 6.9777 |
| 140 | 361.3 | 589.11 | 2144.75 | 2733.87 | 1.7390 | 5.1908 | 6.9298 |
| 145 | 415.4 | 610.61 | 2129.65 | 2740.26 | 1.7906 | 5.0926 | 6.8832 |
| 150 | 475.9 | 632.18 | 2114.26 | 2746.44 | 1.8417 | 4.9960 | 6.8378 |
| 155 | 543.1 | 653.82 | 2098.56 | 2752.39 | 1.8924 | 4.9010 | 6.7934 |
| 160 | 617.8 | 675.53 | 2082.55 | 2758.09 | 1.9426 | 4.8075 | 6.7501 |
| 165 | 700.5 | 697.32 | 2066.20 | 2763.53 | 1.9924 | 4.7153 | 6.7078 |
| 170 | 791.7 | 719.20 | 2049.50 | 2768.70 | 2.0418 | 4.6244 | 6.6663 |
| 175 | 892.0 | 741.16 | 2032.42 | 2773.58 | 2.0909 | 4.5347 | 6.6256 |
| 180 | 1002.2 | 763.21 | 2014.96 | 2778.16 | 2.1395 | 4.4461 | 6.5857 |
| 185 | 1122.7 | 785.36 | 1997.07 | 2782.43 | 2.1878 | 4.3586 | 6.5464 |
| 190 | 1254.4 | 807.61 | 1978.76 | 2786.37 | 2.2358 | 4.2720 | 6.5078 |

TABLE B.1.1 (continued)
Saturated Water

| Temp. (°C) | Press. (kPa) | SPECIFIC VOLUME, m ³ /kg | | | INTERNAL ENERGY, kJ/kg | | |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid v_f | Evap. v_{fg} | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Evap. u_{fg} | Sat. Vapor u_g |
| 195 | 1397.8 | 0.001149 | 0.13990 | 0.14105 | 828.36 | 1764.43 | 2592.79 |
| 200 | 1553.8 | 0.001156 | 0.12620 | 0.12736 | 850.64 | 1744.66 | 2595.29 |
| 205 | 1723.0 | 0.001164 | 0.11405 | 0.11521 | 873.02 | 1724.49 | 2597.52 |
| 210 | 1906.3 | 0.001173 | 0.10324 | 0.10441 | 895.51 | 1703.93 | 2599.44 |
| 215 | 2104.2 | 0.001181 | 0.09361 | 0.09479 | 918.12 | 1682.94 | 2601.06 |
| 220 | 2317.8 | 0.001190 | 0.08500 | 0.08619 | 940.85 | 1661.49 | 2602.35 |
| 225 | 2547.7 | 0.001199 | 0.07729 | 0.07849 | 963.72 | 1639.58 | 2603.30 |
| 230 | 2794.9 | 0.001209 | 0.07037 | 0.07158 | 986.72 | 1617.17 | 2603.89 |
| 235 | 3060.1 | 0.001219 | 0.06415 | 0.06536 | 1009.88 | 1594.24 | 2604.11 |
| 240 | 3344.2 | 0.001229 | 0.05853 | 0.05976 | 1033.19 | 1570.75 | 2603.95 |
| 245 | 3648.2 | 0.001240 | 0.05346 | 0.05470 | 1056.69 | 1546.68 | 2603.37 |
| 250 | 3973.0 | 0.001251 | 0.04887 | 0.05013 | 1080.37 | 1522.00 | 2602.37 |
| 255 | 4319.5 | 0.001263 | 0.04471 | 0.04598 | 1104.26 | 1496.66 | 2600.93 |
| 260 | 4688.6 | 0.001276 | 0.04093 | 0.04220 | 1128.37 | 1470.64 | 2599.01 |
| 265 | 5081.3 | 0.001289 | 0.03748 | 0.03877 | 1152.72 | 1443.87 | 2596.60 |
| 270 | 5498.7 | 0.001302 | 0.03434 | 0.03564 | 1177.33 | 1416.33 | 2593.66 |
| 275 | 5941.8 | 0.001317 | 0.03147 | 0.03279 | 1202.23 | 1387.94 | 2590.17 |
| 280 | 6411.7 | 0.001332 | 0.02884 | 0.03017 | 1227.43 | 1358.66 | 2586.09 |
| 285 | 6909.4 | 0.001348 | 0.02642 | 0.02777 | 1252.98 | 1328.41 | 2581.38 |
| 290 | 7436.0 | 0.001366 | 0.02420 | 0.02557 | 1278.89 | 1297.11 | 2575.99 |
| 295 | 7992.8 | 0.001384 | 0.02216 | 0.02354 | 1305.21 | 1264.67 | 2569.87 |
| 300 | 8581.0 | 0.001404 | 0.02027 | 0.02167 | 1331.97 | 1230.99 | 2562.96 |
| 305 | 9201.8 | 0.001425 | 0.01852 | 0.01995 | 1359.22 | 1195.94 | 2555.16 |
| 310 | 9856.6 | 0.001447 | 0.01690 | 0.01835 | 1387.03 | 1159.37 | 2546.40 |
| 315 | 10547 | 0.001472 | 0.01539 | 0.01687 | 1415.44 | 1121.11 | 2536.55 |
| 320 | 11274 | 0.001499 | 0.01399 | 0.01549 | 1444.55 | 1080.93 | 2525.48 |
| 325 | 12040 | 0.001528 | 0.01267 | 0.01420 | 1474.44 | 1038.57 | 2513.01 |
| 330 | 12845 | 0.001561 | 0.01144 | 0.01300 | 1505.24 | 993.66 | 2498.91 |
| 335 | 13694 | 0.001597 | 0.01027 | 0.01186 | 1537.11 | 945.77 | 2482.88 |
| 340 | 14586 | 0.001638 | 0.00916 | 0.01080 | 1570.26 | 894.26 | 2464.53 |
| 345 | 15525 | 0.001685 | 0.00810 | 0.00978 | 1605.01 | 838.29 | 2443.30 |
| 350 | 16514 | 0.001740 | 0.00707 | 0.00881 | 1641.81 | 776.58 | 2418.39 |
| 355 | 17554 | 0.001807 | 0.00607 | 0.00787 | 1681.41 | 707.11 | 2388.52 |
| 360 | 18651 | 0.001892 | 0.00505 | 0.00694 | 1725.19 | 626.29 | 2351.47 |
| 365 | 19807 | 0.002011 | 0.00398 | 0.00599 | 1776.13 | 526.54 | 2302.67 |
| 370 | 21028 | 0.002213 | 0.00271 | 0.00493 | 1843.84 | 384.69 | 2228.53 |
| 374.1 | 22089 | 0.003155 | 0 | 0.00315 | 2029.58 | 0 | 2029.58 |

TABLE B.1.1 (continued)
Saturated Water

| Temp. (°C) | Press. (kPa) | ENTHALPY, kJ/kg | | | ENTROPY, kJ/kg·K | | |
|---------------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Evap. s_{fg} | Sat. Vapor s_g |
| 195 | 1397.8 | 829.96 | 1959.99 | 2789.96 | 2.2835 | 4.1863 | 6.4697 |
| 200 | 1553.8 | 852.43 | 1940.75 | 2793.18 | 2.3308 | 4.1014 | 6.4322 |
| 205 | 1723.0 | 875.03 | 1921.00 | 2796.03 | 2.3779 | 4.0172 | 6.3951 |
| 210 | 1906.3 | 897.75 | 1900.73 | 2798.48 | 2.4247 | 3.9337 | 6.3584 |
| 215 | 2104.2 | 920.61 | 1879.91 | 2800.51 | 2.4713 | 3.8507 | 6.3221 |
| 220 | 2317.8 | 943.61 | 1858.51 | 2802.12 | 2.5177 | 3.7683 | 6.2860 |
| 225 | 2547.7 | 966.77 | 1836.50 | 2803.27 | 2.5639 | 3.6863 | 6.2502 |
| 230 | 2794.9 | 990.10 | 1813.85 | 2803.95 | 2.6099 | 3.6047 | 6.2146 |
| 235 | 3060.1 | 1013.61 | 1790.53 | 2804.13 | 2.6557 | 3.5233 | 6.1791 |
| 240 | 3344.2 | 1037.31 | 1766.50 | 2803.81 | 2.7015 | 3.4422 | 6.1436 |
| 245 | 3648.2 | 1061.21 | 1741.73 | 2802.95 | 2.7471 | 3.3612 | 6.1083 |
| 250 | 3973.0 | 1085.34 | 1716.18 | 2801.52 | 2.7927 | 3.2802 | 6.0729 |
| 255 | 4319.5 | 1109.72 | 1689.80 | 2799.51 | 2.8382 | 3.1992 | 6.0374 |
| 260 | 4688.6 | 1134.35 | 1662.54 | 2796.89 | 2.8837 | 3.1181 | 6.0018 |
| 265 | 5081.3 | 1159.27 | 1634.34 | 2793.61 | 2.9293 | 3.0368 | 5.9661 |
| 270 | 5498.7 | 1184.49 | 1605.16 | 2789.65 | 2.9750 | 2.9551 | 5.9301 |
| 275 | 5941.8 | 1210.05 | 1574.92 | 2784.97 | 3.0208 | 2.8730 | 5.8937 |
| 280 | 6411.7 | 1235.97 | 1543.55 | 2779.53 | 3.0667 | 2.7903 | 5.8570 |
| 285 | 6909.4 | 1262.29 | 1510.97 | 2773.27 | 3.1129 | 2.7069 | 5.8198 |
| 290 | 7436.0 | 1289.04 | 1477.08 | 2766.13 | 3.1593 | 2.6227 | 5.7821 |
| 295 | 7992.8 | 1316.27 | 1441.78 | 2758.05 | 3.2061 | 2.5375 | 5.7436 |
| 300 | 8581.0 | 1344.01 | 1404.93 | 2748.94 | 3.2533 | 2.4511 | 5.7044 |
| 305 | 9201.8 | 1372.33 | 1366.38 | 2738.72 | 3.3009 | 2.3633 | 5.6642 |
| 310 | 9856.6 | 1401.29 | 1325.97 | 2727.27 | 3.3492 | 2.2737 | 5.6229 |
| 315 | 10547 | 1430.97 | 1283.48 | 2714.44 | 3.3981 | 2.1821 | 5.5803 |
| 320 | 11274 | 1461.45 | 1238.64 | 2700.08 | 3.4479 | 2.0882 | 5.5361 |
| 325 | 12040 | 1492.84 | 1191.13 | 2683.97 | 3.4987 | 1.9913 | 5.4900 |
| 330 | 12845 | 1525.29 | 1140.56 | 2665.85 | 3.5506 | 1.8909 | 5.4416 |
| 335 | 13694 | 1558.98 | 1086.37 | 2645.35 | 3.6040 | 1.7863 | 5.3903 |
| 340 | 14586 | 1594.15 | 1027.86 | 2622.01 | 3.6593 | 1.6763 | 5.3356 |
| 345 | 15525 | 1631.17 | 964.02 | 2595.19 | 3.7169 | 1.5594 | 5.2763 |
| 350 | 16514 | 1670.54 | 893.38 | 2563.92 | 3.7776 | 1.4336 | 5.2111 |
| 355 | 17554 | 1713.13 | 813.59 | 2526.72 | 3.8427 | 1.2951 | 5.1378 |
| 360 | 18651 | 1760.48 | 720.52 | 2481.00 | 3.9146 | 1.1379 | 5.0525 |
| 365 | 19807 | 1815.96 | 605.44 | 2421.40 | 3.9983 | 0.9487 | 4.9470 |
| 370 | 21028 | 1890.37 | 441.75 | 2332.12 | 4.1104 | 0.6868 | 4.7972 |
| 374.1 | 22089 | 2099.26 | 0 | 2099.26 | 4.4297 | 0 | 4.4297 |

TABLE B.1.2
Saturated Water Pressure Entry

| Press. (kPa) | Temp. (°C) | SPECIFIC VOLUME, m ³ /kg | | | INTERNAL ENERGY, kJ/kg | | |
|-----------------|---------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid v_f | Evap. v_{fg} | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Evap. u_{fg} | Sat. Vapor u_g |
| 0.6113 | 0.01 | 0.001000 | 206.131 | 206.132 | 0 | 2375.3 | 2375.3 |
| 1 | 6.98 | 0.001000 | 129.20702 | 129.20802 | 29.29 | 2355.69 | 2384.98 |
| 1.5 | 13.03 | 0.001001 | 87.97913 | 87.98013 | 54.70 | 2338.63 | 2393.32 |
| 2 | 17.50 | 0.001001 | 67.00285 | 67.00385 | 73.47 | 2326.02 | 2399.48 |
| 2.5 | 21.08 | 0.001002 | 54.25285 | 54.25385 | 88.47 | 2315.93 | 2404.40 |
| 3 | 24.08 | 0.001003 | 45.66402 | 45.66502 | 101.03 | 2307.48 | 2408.51 |
| 4 | 28.96 | 0.001004 | 34.79915 | 34.80015 | 121.44 | 2293.73 | 2415.17 |
| 5 | 32.88 | 0.001005 | 28.19150 | 28.19251 | 137.79 | 2282.70 | 2420.49 |
| 7.5 | 40.29 | 0.001008 | 19.23674 | 19.23775 | 168.76 | 2261.74 | 2430.50 |
| 10 | 45.81 | 0.001010 | 14.67254 | 14.67355 | 191.79 | 2246.10 | 2437.89 |
| 15 | 53.97 | 0.001014 | 10.02117 | 10.02218 | 225.90 | 2222.83 | 2448.73 |
| 20 | 60.06 | 0.001017 | 7.64835 | 7.64937 | 251.35 | 2205.36 | 2456.71 |
| 25 | 64.97 | 0.001020 | 6.20322 | 6.20424 | 271.88 | 2191.21 | 2463.08 |
| 30 | 69.10 | 0.001022 | 5.22816 | 5.22918 | 289.18 | 2179.22 | 2468.40 |
| 40 | 75.87 | 0.001026 | 3.99243 | 3.99345 | 317.51 | 2159.49 | 2477.00 |
| 50 | 81.33 | 0.001030 | 3.23931 | 3.24034 | 340.42 | 2143.43 | 2483.85 |
| 75 | 91.77 | 0.001037 | 2.21607 | 2.21711 | 394.29 | 2112.39 | 2496.67 |
| 100 | 99.62 | 0.001043 | 1.69296 | 1.69400 | 417.33 | 2088.72 | 2506.06 |
| 125 | 105.99 | 0.001048 | 1.37385 | 1.37490 | 444.16 | 2069.32 | 2513.48 |
| 150 | 111.37 | 0.001053 | 1.15828 | 1.15933 | 466.92 | 2052.72 | 2519.64 |
| 175 | 116.06 | 0.001057 | 1.00257 | 1.00363 | 486.78 | 2038.12 | 2524.90 |
| 200 | 120.23 | 0.001061 | 0.88467 | 0.88573 | 504.47 | 2025.02 | 2529.49 |
| 225 | 124.00 | 0.001064 | 0.79219 | 0.79325 | 520.45 | 2013.10 | 2533.56 |
| 250 | 127.43 | 0.001067 | 0.71765 | 0.71871 | 535.08 | 2002.14 | 2537.21 |
| 275 | 130.60 | 0.001070 | 0.65624 | 0.65731 | 548.57 | 1991.95 | 2540.53 |
| 300 | 133.55 | 0.001073 | 0.60475 | 0.60582 | 561.13 | 1982.43 | 2543.55 |
| 325 | 136.30 | 0.001076 | 0.56093 | 0.56201 | 572.88 | 1973.46 | 2546.34 |
| 350 | 138.88 | 0.001079 | 0.52317 | 0.52425 | 583.93 | 1964.98 | 2548.92 |
| 375 | 141.32 | 0.001081 | 0.49029 | 0.49137 | 594.38 | 1956.93 | 2551.31 |
| 400 | 143.63 | 0.001084 | 0.46138 | 0.46246 | 604.29 | 1949.26 | 2553.55 |
| 450 | 147.93 | 0.001088 | 0.41289 | 0.41398 | 622.75 | 1934.87 | 2557.62 |
| 500 | 151.86 | 0.001093 | 0.37380 | 0.37489 | 639.66 | 1921.57 | 2561.23 |
| 550 | 155.48 | 0.001097 | 0.34159 | 0.34268 | 655.30 | 1909.17 | 2564.47 |
| 600 | 158.85 | 0.001101 | 0.31457 | 0.31567 | 669.88 | 1897.52 | 2567.40 |
| 650 | 162.01 | 0.001104 | 0.29158 | 0.29268 | 683.55 | 1886.51 | 2570.06 |
| 700 | 164.97 | 0.001108 | 0.27176 | 0.27286 | 696.43 | 1876.07 | 2572.49 |
| 750 | 167.77 | 0.001111 | 0.25449 | 0.25560 | 708.62 | 1866.11 | 2574.73 |
| 800 | 170.43 | 0.001115 | 0.23931 | 0.24043 | 720.20 | 1856.58 | 2576.79 |

TABLE B.1.2 (Continued)
Saturated Water Pressure Entry

| Press. (kPa) | Temp. (°C) | ENTHALPY, kJ/kg | | | ENTROPY, kJ/kg-K | | |
|-----------------|---------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Evap. s_{fg} | Sat. Vapor s_g |
| 0.6113 | 0.01 | 0.00 | 2501.3 | 2501.3 | 0 | 9.1562 | 9.1562 |
| 1.0 | 6.98 | 29.29 | 2484.89 | 2514.18 | 0.1059 | 8.8697 | 8.9756 |
| 1.5 | 13.03 | 54.70 | 2470.59 | 2525.30 | 0.1956 | 8.6322 | 8.8278 |
| 2.0 | 17.50 | 73.47 | 2460.02 | 2533.49 | 0.2607 | 8.4629 | 8.7236 |
| 2.5 | 21.08 | 88.47 | 2451.56 | 2540.03 | 0.3120 | 8.3311 | 8.6431 |
| 3.0 | 24.08 | 101.03 | 2444.47 | 2545.50 | 0.3545 | 8.2231 | 8.5775 |
| 4.0 | 28.96 | 121.44 | 2432.93 | 2554.37 | 0.4226 | 8.0520 | 8.4746 |
| 5.0 | 32.88 | 137.79 | 2423.66 | 2561.45 | 0.4763 | 7.9187 | 8.3950 |
| 7.5 | 40.29 | 168.77 | 2406.02 | 2574.79 | 0.5763 | 7.6751 | 8.2514 |
| 10 | 45.81 | 191.81 | 2392.82 | 2584.63 | 0.6492 | 7.5010 | 8.1501 |
| 15 | 53.97 | 225.91 | 2373.14 | 2599.06 | 0.7548 | 7.2536 | 8.0084 |
| 20 | 60.06 | 251.38 | 2358.33 | 2609.70 | 0.8319 | 7.0766 | 7.9085 |
| 25 | 64.97 | 271.90 | 2346.29 | 2618.19 | 0.8930 | 6.9383 | 7.8313 |
| 30 | 69.10 | 289.21 | 2336.07 | 2625.28 | 0.9439 | 6.8247 | 7.7686 |
| 40 | 75.87 | 317.55 | 2319.19 | 2636.74 | 1.0258 | 6.6441 | 7.6700 |
| 50 | 81.33 | 340.47 | 2305.40 | 2645.87 | 1.0910 | 6.5029 | 7.5939 |
| 75 | 91.77 | 384.36 | 2278.59 | 2662.96 | 1.2129 | 6.2434 | 7.4563 |
| 100 | 99.62 | 417.44 | 2258.02 | 2675.46 | 1.3025 | 6.0568 | 7.3593 |
| 125 | 105.99 | 444.30 | 2241.05 | 2685.35 | 1.3739 | 5.9104 | 7.2843 |
| 150 | 111.37 | 467.08 | 2226.46 | 2693.54 | 1.4335 | 5.7897 | 7.2232 |
| 175 | 116.06 | 486.97 | 2213.57 | 2700.53 | 1.4848 | 5.6868 | 7.1717 |
| 200 | 120.23 | 504.68 | 2201.96 | 2706.63 | 1.5300 | 5.5970 | 7.1271 |
| 225 | 124.00 | 520.69 | 2191.35 | 2712.04 | 1.5705 | 5.5173 | 7.0878 |
| 250 | 127.43 | 535.34 | 2181.55 | 2716.89 | 1.6072 | 5.4455 | 7.0526 |
| 275 | 130.60 | 548.87 | 2172.42 | 2721.29 | 1.6407 | 5.3801 | 7.0208 |
| 300 | 133.55 | 561.45 | 2163.85 | 2725.30 | 1.6717 | 5.3201 | 6.9918 |
| 325 | 136.30 | 573.23 | 2155.76 | 2728.99 | 1.7005 | 5.2646 | 6.9651 |
| 350 | 138.88 | 584.31 | 2148.10 | 2732.40 | 1.7274 | 5.2130 | 6.9404 |
| 375 | 141.32 | 594.79 | 2140.79 | 2735.58 | 1.7527 | 5.1647 | 6.9174 |
| 400 | 143.63 | 604.73 | 2133.81 | 2738.53 | 1.7766 | 5.1193 | 6.8958 |
| 450 | 147.93 | 623.24 | 2120.67 | 2743.91 | 1.8206 | 5.0359 | 6.8565 |
| 500 | 151.86 | 640.21 | 2108.47 | 2748.67 | 1.8606 | 4.9606 | 6.8212 |
| 550 | 155.48 | 655.91 | 2097.04 | 2752.94 | 1.8972 | 4.8920 | 6.7892 |
| 600 | 158.85 | 670.54 | 2086.26 | 2756.80 | 1.9311 | 4.8289 | 6.7600 |
| 650 | 162.01 | 684.26 | 2076.04 | 2760.30 | 1.9627 | 4.7704 | 6.7330 |
| 700 | 164.97 | 697.20 | 2066.30 | 2763.50 | 1.9922 | 4.7158 | 6.7080 |
| 750 | 167.77 | 709.45 | 2056.98 | 2766.43 | 2.0199 | 4.6647 | 6.6846 |
| 800 | 170.43 | 721.10 | 2048.04 | 2769.13 | 2.0461 | 4.6166 | 6.6627 |

TABLE B.1.2 (continued)
Saturated Water Pressure Entry

| Press. (kPa) | Temp. (°C) | SPECIFIC VOLUME, m ³ /kg | | | INTERNAL ENERGY, kJ/kg | | |
|-----------------|---------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid v_f | Evap. v_{fg} | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Evap. u_{fg} | Sat. Vapor u_g |
| 850 | 172.96 | 0.001118 | 0.22586 | 0.22698 | 731.25 | 1847.45 | 2578.69 |
| 900 | 175.38 | 0.001121 | 0.21385 | 0.21497 | 741.81 | 1838.65 | 2580.46 |
| 950 | 177.69 | 0.001124 | 0.20306 | 0.20419 | 751.94 | 1830.17 | 2582.11 |
| 1000 | 179.91 | 0.001127 | 0.19332 | 0.19444 | 761.67 | 1821.97 | 2583.64 |
| 1100 | 184.09 | 0.001133 | 0.17639 | 0.17753 | 780.08 | 1806.32 | 2586.40 |
| 1200 | 187.99 | 0.001139 | 0.16220 | 0.16333 | 797.27 | 1791.55 | 2588.82 |
| 1300 | 191.64 | 0.001144 | 0.15011 | 0.15125 | 813.42 | 1777.53 | 2590.95 |
| 1400 | 195.07 | 0.001149 | 0.13969 | 0.14084 | 828.68 | 1764.15 | 2592.83 |
| 1500 | 198.32 | 0.001154 | 0.13062 | 0.13177 | 843.14 | 1751.3 | 2594.5 |
| 1750 | 205.76 | 0.001166 | 0.11232 | 0.11349 | 876.44 | 1721.39 | 2597.83 |
| 2000 | 212.42 | 0.001177 | 0.09845 | 0.09963 | 906.42 | 1693.84 | 2600.26 |
| 2250 | 218.45 | 0.001187 | 0.08756 | 0.08875 | 933.81 | 1668.18 | 2601.98 |
| 2500 | 223.99 | 0.001197 | 0.07878 | 0.07998 | 959.09 | 1644.04 | 2603.13 |
| 2750 | 229.12 | 0.001207 | 0.07154 | 0.07275 | 982.65 | 1621.16 | 2603.81 |
| 3000 | 233.90 | 0.001216 | 0.06546 | 0.06668 | 1004.76 | 1599.34 | 2604.10 |
| 3250 | 238.38 | 0.001226 | 0.06029 | 0.06152 | 1025.62 | 1578.43 | 2604.04 |
| 3500 | 242.60 | 0.001235 | 0.05583 | 0.05707 | 1045.41 | 1558.29 | 2603.70 |
| 4000 | 250.40 | 0.001252 | 0.04853 | 0.04978 | 1082.28 | 1519.99 | 2602.27 |
| 5000 | 263.99 | 0.001286 | 0.03815 | 0.03944 | 1147.78 | 1449.34 | 2597.12 |
| 6000 | 275.64 | 0.001319 | 0.03112 | 0.03244 | 1205.41 | 1384.27 | 2589.69 |
| 7000 | 285.88 | 0.001351 | 0.02602 | 0.02737 | 1257.51 | 1322.97 | 2580.48 |
| 8000 | 295.06 | 0.001384 | 0.02213 | 0.02352 | 1305.54 | 1264.25 | 2569.79 |
| 9000 | 303.40 | 0.001418 | 0.01907 | 0.02048 | 1350.47 | 1207.28 | 2557.75 |
| 10000 | 311.06 | 0.001452 | 0.01657 | 0.01803 | 1393.00 | 1151.40 | 2544.41 |
| 11000 | 318.15 | 0.001489 | 0.01450 | 0.01599 | 1433.68 | 1096.06 | 2529.74 |
| 12000 | 324.75 | 0.001527 | 0.01274 | 0.01426 | 1472.92 | 1040.76 | 2513.67 |
| 13000 | 330.93 | 0.001567 | 0.01121 | 0.01278 | 1511.09 | 984.99 | 2496.08 |
| 14000 | 336.75 | 0.001611 | 0.00987 | 0.01149 | 1548.53 | 928.23 | 2476.76 |
| 15000 | 342.24 | 0.001658 | 0.00868 | 0.01034 | 1585.58 | 869.85 | 2455.43 |
| 16000 | 347.43 | 0.001711 | 0.00760 | 0.00931 | 1622.63 | 809.07 | 2431.70 |
| 17000 | 352.37 | 0.001770 | 0.00659 | 0.00836 | 1660.16 | 744.80 | 2404.96 |
| 18000 | 357.06 | 0.001840 | 0.00565 | 0.00749 | 1698.86 | 675.42 | 2374.28 |
| 19000 | 361.54 | 0.001924 | 0.00473 | 0.00666 | 1739.87 | 598.18 | 2338.05 |
| 20000 | 365.81 | 0.002035 | 0.00380 | 0.00583 | 1785.47 | 507.58 | 2293.05 |
| 21000 | 369.89 | 0.002206 | 0.00275 | 0.00495 | 1841.97 | 388.74 | 2230.71 |
| 22000 | 373.80 | 0.002808 | 0.00072 | 0.00353 | 1973.16 | 108.24 | 2081.39 |
| 22089 | 374.14 | 0.003155 | 0 | 0.00315 | 2029.58 | 0 | 2029.58 |

TABLE B.1.2 (Continued)
Saturated Water Pressure Entry

| Press. (kPa) | Temp. (°C) | ENTHALPY, kJ/kg | | | ENTROPY, kJ/kg·K | | |
|-----------------|---------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| | | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Evap. s_{fg} | Sat. Vapor s_g |
| 850 | 172.96 | 732.20 | 2039.43 | 2771.63 | 2.0709 | 4.5711 | 6.6421 |
| 900 | 175.38 | 742.82 | 2031.12 | 2773.94 | 2.0946 | 4.5280 | 6.6225 |
| 950 | 177.69 | 753.00 | 2023.08 | 2776.08 | 2.1171 | 4.4869 | 6.6040 |
| 1000 | 179.91 | 762.79 | 2015.29 | 2778.08 | 2.1386 | 4.4478 | 6.5864 |
| 1100 | 184.09 | 781.32 | 2000.36 | 2781.68 | 2.1791 | 4.3744 | 6.5535 |
| 1200 | 187.99 | 798.64 | 1986.19 | 2784.82 | 2.2165 | 4.3067 | 6.5233 |
| 1300 | 191.64 | 814.91 | 1972.67 | 2787.58 | 2.2514 | 4.2438 | 6.4953 |
| 1400 | 195.07 | 830.29 | 1959.72 | 2790.00 | 2.2842 | 4.1850 | 6.4692 |
| 1500 | 198.32 | 844.87 | 1947.28 | 2792.15 | 2.3150 | 4.1298 | 6.4448 |
| 1750 | 205.76 | 878.48 | 1917.95 | 2796.43 | 2.3851 | 4.0044 | 6.3895 |
| 2000 | 212.42 | 908.77 | 1890.74 | 2799.51 | 2.4473 | 3.8935 | 6.3408 |
| 2250 | 218.45 | 936.48 | 1865.19 | 2801.67 | 2.5034 | 3.7938 | 6.2971 |
| 2500 | 223.99 | 962.09 | 1840.98 | 2803.07 | 2.5546 | 3.7028 | 6.2574 |
| 2750 | 229.12 | 985.97 | 1817.89 | 2803.86 | 2.6018 | 3.6190 | 6.2208 |
| 3000 | 233.90 | 1008.41 | 1795.73 | 2804.14 | 2.6456 | 3.5412 | 6.1869 |
| 3250 | 238.38 | 1029.60 | 1774.37 | 2803.97 | 2.6866 | 3.4685 | 6.1551 |
| 3500 | 242.60 | 1049.73 | 1753.70 | 2803.43 | 2.7252 | 3.4000 | 6.1252 |
| 4000 | 250.40 | 1087.29 | 1714.09 | 2801.38 | 2.7963 | 3.2737 | 6.0700 |
| 5000 | 263.99 | 1154.21 | 1640.12 | 2794.33 | 2.9201 | 3.0532 | 5.9733 |
| 6000 | 275.64 | 1213.32 | 1571.00 | 2784.33 | 3.0266 | 2.8625 | 5.8891 |
| 7000 | 285.88 | 1266.97 | 1505.10 | 2772.07 | 3.1210 | 2.6922 | 5.8132 |
| 8000 | 295.06 | 1316.61 | 1441.33 | 2757.94 | 3.2067 | 2.5365 | 5.7431 |
| 9000 | 303.40 | 1363.23 | 1378.88 | 2742.11 | 3.2857 | 2.3915 | 5.6771 |
| 10000 | 311.06 | 1407.53 | 1317.14 | 2724.67 | 3.3595 | 2.2545 | 5.6140 |
| 11000 | 318.15 | 1450.05 | 1255.55 | 2705.60 | 3.4294 | 2.1233 | 5.5527 |
| 12000 | 324.75 | 1491.24 | 1193.59 | 2684.83 | 3.4961 | 1.9962 | 5.4923 |
| 13000 | 330.93 | 1531.46 | 1130.76 | 2662.22 | 3.5604 | 1.8718 | 5.4323 |
| 14000 | 336.75 | 1571.08 | 1066.47 | 2637.55 | 3.6231 | 1.7485 | 5.3716 |
| 15000 | 342.24 | 1610.45 | 1000.04 | 2610.49 | 3.6847 | 1.6250 | 5.3097 |
| 16000 | 347.43 | 1650.00 | 930.59 | 2580.59 | 3.7460 | 1.4995 | 5.2454 |
| 17000 | 352.37 | 1690.25 | 856.90 | 2547.15 | 3.8078 | 1.3698 | 5.1776 |
| 18000 | 357.06 | 1731.97 | 777.13 | 2509.09 | 3.8713 | 1.2330 | 5.1044 |
| 19000 | 361.54 | 1776.43 | 688.11 | 2464.54 | 3.9387 | 1.0841 | 5.0227 |
| 20000 | 365.81 | 1826.18 | 583.56 | 2409.74 | 4.0137 | 0.9132 | 4.9269 |
| 21000 | 369.89 | 1888.30 | 446.42 | 2334.72 | 4.1073 | 0.6942 | 4.8015 |
| 22000 | 373.80 | 2034.92 | 124.04 | 2158.97 | 4.3307 | 0.1917 | 4.5224 |
| 22089 | 374.14 | 2099.26 | 0 | 2099.26 | 4.4297 | 0 | 4.4297 |

TABLE B.1.3
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) |
|------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|------------------|
| $P = 10 \text{ kPa (45.81)}$ | | | | | $P = 50 \text{ kPa (81.33)}$ | | | |
| Sat. | 14.67355 | 2437.89 | 2584.63 | 8.1501 | 3.24034 | 2483.85 | 2645.87 | 7.5939 |
| 50 | 14.86920 | 2443.87 | 2592.56 | 8.1749 | — | — | — | — |
| 100 | 17.19561 | 2515.50 | 2687.46 | 8.4479 | 3.41833 | 2511.61 | 2682.52 | 7.6947 |
| 150 | 19.51251 | 2587.86 | 2782.99 | 8.6881 | 3.88937 | 2585.61 | 2780.08 | 7.9400 |
| 200 | 21.82507 | 2661.27 | 2879.52 | 8.9037 | 4.35595 | 2659.85 | 2877.64 | 8.1579 |
| 250 | 24.13559 | 2735.95 | 2977.31 | 9.1002 | 4.82045 | 2734.97 | 2975.99 | 8.3555 |
| 300 | 26.44508 | 2812.06 | 3076.51 | 9.2812 | 5.28391 | 2811.33 | 3075.52 | 8.5372 |
| 400 | 31.06252 | 2968.89 | 3279.51 | 9.6076 | 6.20929 | 2968.43 | 3278.89 | 8.8641 |
| 500 | 35.67896 | 3132.26 | 3489.05 | 9.8977 | 7.13364 | 3131.94 | 3488.62 | 9.1545 |
| 600 | 40.29488 | 3302.45 | 3705.40 | 10.1608 | 8.05748 | 3302.22 | 3705.10 | 9.4177 |
| 700 | 44.91052 | 3479.63 | 3928.73 | 10.4028 | 8.98104 | 3479.45 | 3928.51 | 9.6599 |
| 800 | 49.52599 | 3663.84 | 4159.10 | 10.6281 | 9.90444 | 3663.70 | 4158.92 | 9.8852 |
| 900 | 54.14137 | 3855.03 | 4396.44 | 10.8395 | 10.82773 | 3854.91 | 4396.30 | 10.0967 |
| 1000 | 58.75669 | 4053.01 | 4640.58 | 11.0392 | 11.75097 | 4052.91 | 4640.46 | 10.2964 |
| 1100 | 63.37198 | 4257.47 | 4891.19 | 11.2287 | 12.67418 | 4257.37 | 4891.08 | 10.4858 |
| 1200 | 67.98724 | 4467.91 | 5147.78 | 11.4090 | 13.59737 | 4467.82 | 5147.69 | 10.6662 |
| 1300 | 72.60250 | 4683.68 | 5409.70 | 14.5810 | 14.52054 | 4683.58 | 5409.61 | 10.8382 |
| 100 kPa (99.62) | | | | | 200 kPa (120.23) | | | |
| Sat. | 1.69400 | 2506.06 | 2675.46 | 7.3593 | 0.88573 | 2529.49 | 2706.63 | 7.1271 |
| 150 | 1.93636 | 2582.75 | 2776.38 | 7.6133 | 0.95964 | 2576.87 | 2768.80 | 7.2795 |
| 200 | 2.17226 | 2658.05 | 2875.27 | 7.8342 | 1.08034 | 2654.39 | 2870.46 | 7.5066 |
| 250 | 2.40604 | 2733.73 | 2974.33 | 8.0332 | 1.19880 | 2731.22 | 2970.98 | 7.7085 |
| 300 | 2.63876 | 2810.41 | 3074.28 | 8.2157 | 1.31616 | 2808.55 | 3071.79 | 7.8926 |
| 400 | 3.10263 | 2967.85 | 3278.11 | 8.5434 | 1.54930 | 2966.69 | 3276.55 | 8.2217 |
| 500 | 3.56547 | 3131.54 | 3488.09 | 8.8341 | 1.78139 | 3130.75 | 3487.03 | 8.5132 |
| 600 | 4.02781 | 3301.94 | 3704.72 | 9.0975 | 2.01297 | 3301.36 | 3703.96 | 8.7769 |
| 700 | 4.48986 | 3479.24 | 3928.23 | 9.3398 | 2.24426 | 3478.81 | 3927.66 | 9.0194 |
| 800 | 4.95174 | 3663.53 | 4158.71 | 9.5652 | 2.47539 | 3663.19 | 4158.27 | 9.2450 |
| 900 | 5.41353 | 3854.77 | 4396.12 | 9.7767 | 2.70643 | 3854.49 | 4395.77 | 9.4565 |
| 1000 | 5.87526 | 4052.78 | 4640.31 | 9.9764 | 2.93740 | 4052.53 | 4640.01 | 9.6563 |
| 1100 | 6.33696 | 4257.25 | 4890.95 | 10.1658 | 3.16834 | 4257.01 | 4890.68 | 9.8458 |
| 1200 | 6.79863 | 4467.70 | 5147.56 | 10.3462 | 3.39927 | 4467.46 | 5147.32 | 10.0262 |
| 1300 | 7.26030 | 4683.47 | 5409.49 | 10.5182 | 3.63018 | 4683.23 | 5409.26 | 10.1982 |
| 300 kPa (133.55) | | | | | 400 kPa (143.63) | | | |
| Sat. | 0.60582 | 2543.55 | 2725.30 | 6.9918 | 0.46246 | 2553.55 | 2738.53 | 6.8958 |
| 150 | 0.63388 | 2570.79 | 2760.95 | 7.0778 | 0.47084 | 2564.48 | 2752.82 | 6.9299 |
| 200 | 0.71629 | 2650.65 | 2865.54 | 7.3115 | 0.53422 | 2646.83 | 2860.51 | 7.1706 |

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) |
|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 300 kPa (133.55) | | | | | 400 kPa (143.63) | | | |
| 250 | 0.79636 | 2728.69 | 2967.59 | 7.5165 | 0.59512 | 2726.11 | 2964.16 | 7.3788 |
| 300 | 0.87529 | 2806.69 | 3069.28 | 7.7022 | 0.65484 | 2804.81 | 3066.75 | 7.5661 |
| 400 | 1.03151 | 2965.53 | 3274.98 | 8.0329 | 0.77262 | 2964.36 | 3273.41 | 7.8984 |
| 500 | 1.18669 | 3129.95 | 3485.96 | 8.3250 | 0.88934 | 3129.15 | 3484.89 | 8.1912 |
| 600 | 1.34136 | 3300.79 | 3703.20 | 8.5892 | 1.00555 | 3300.22 | 3702.44 | 8.4557 |
| 700 | 1.49573 | 3478.38 | 3927.10 | 8.8319 | 1.12147 | 3477.95 | 3926.53 | 8.6987 |
| 800 | 1.64994 | 3662.85 | 4157.83 | 9.0575 | 1.23722 | 3662.51 | 4157.40 | 8.9244 |
| 900 | 1.80406 | 3854.20 | 4395.42 | 9.2691 | 1.35288 | 3853.91 | 4395.06 | 9.1361 |
| 1000 | 1.95812 | 4052.27 | 4639.71 | 9.4689 | 1.46847 | 4052.02 | 4639.41 | 9.3360 |
| 1100 | 2.11214 | 4256.77 | 4890.41 | 9.6585 | 1.58404 | 4256.53 | 4890.15 | 9.5255 |
| 1200 | 2.26614 | 4467.23 | 5147.07 | 9.8389 | 1.69958 | 4466.99 | 5146.83 | 9.7059 |
| 1300 | 2.42013 | 4682.99 | 5409.03 | 10.0109 | 1.81511 | 4682.75 | 5408.80 | 9.8780 |
| 500 kPa (151.86) | | | | | 600 kPa (158.85) | | | |
| Sat. | 0.37489 | 2561.23 | 2748.67 | 6.8212 | 0.31567 | 2567.40 | 2756.80 | 6.7600 |
| 200 | 0.42492 | 2642.91 | 2855.37 | 7.0592 | 0.35202 | 2638.91 | 2850.12 | 6.9665 |
| 250 | 0.47436 | 2723.50 | 2960.68 | 7.2708 | 0.39383 | 2720.86 | 2957.16 | 7.1816 |
| 300 | 0.52256 | 2802.91 | 3064.20 | 7.4598 | 0.43437 | 2801.00 | 3061.63 | 7.3723 |
| 350 | 0.57012 | 2882.59 | 3167.65 | 7.6328 | 0.47424 | 2881.12 | 3165.66 | 7.5463 |
| 400 | 0.61728 | 2963.19 | 3271.83 | 7.7937 | 0.51372 | 2962.02 | 3270.25 | 7.7078 |
| 500 | 0.71093 | 3128.35 | 3483.82 | 8.0872 | 0.59199 | 3127.55 | 3482.75 | 8.0020 |
| 600 | 0.80406 | 3299.64 | 3701.67 | 8.3521 | 0.66974 | 3299.07 | 3700.91 | 8.2673 |
| 700 | 0.89691 | 3477.52 | 3925.97 | 8.5952 | 0.74720 | 3477.08 | 3925.41 | 8.5107 |
| 800 | 0.98959 | 3662.17 | 4156.96 | 8.8211 | 0.82450 | 3661.83 | 4156.52 | 8.7367 |
| 900 | 1.08217 | 3853.63 | 4394.71 | 9.0329 | 0.90169 | 3853.34 | 4394.36 | 8.9485 |
| 1000 | 1.17469 | 4051.76 | 4639.11 | 9.2328 | 0.97883 | 4051.51 | 4638.81 | 9.1484 |
| 1100 | 1.26718 | 4256.29 | 4889.88 | 9.4224 | 1.05594 | 4256.05 | 4889.61 | 9.3381 |
| 1200 | 1.35964 | 4466.76 | 5146.58 | 9.6028 | 1.13302 | 4466.52 | 5146.34 | 9.5185 |
| 1300 | 1.45210 | 4682.52 | 5408.57 | 9.7749 | 1.21009 | 4682.28 | 5408.34 | 9.6906 |
| 800 kPa (170.43) | | | | | 1000 kPa (179.91) | | | |
| Sat. | 0.24043 | 2576.79 | 2769.13 | 6.6627 | 0.19444 | 2583.64 | 2778.08 | 6.5864 |
| 200 | 0.26080 | 2630.61 | 2839.25 | 6.8158 | 0.20596 | 2621.90 | 2827.86 | 6.6939 |
| 250 | 0.29314 | 2715.46 | 2949.97 | 7.0384 | 0.23268 | 2709.91 | 2942.59 | 6.9246 |
| 300 | 0.32411 | 2797.14 | 3056.43 | 7.2327 | 0.25794 | 2793.21 | 3051.15 | 7.1228 |
| 350 | 0.35439 | 2878.16 | 3161.68 | 7.4088 | 0.28247 | 2875.18 | 3157.65 | 7.3010 |
| 400 | 0.38426 | 2959.66 | 3267.07 | 7.5715 | 0.30659 | 2957.29 | 3263.88 | 7.4650 |
| 500 | 0.44331 | 3125.95 | 3480.60 | 7.8672 | 0.35411 | 3124.34 | 3478.44 | 7.7621 |
| 600 | 0.50184 | 3297.91 | 3699.38 | 8.1332 | 0.40109 | 3296.76 | 3697.85 | 8.0289 |

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 800 kPa (170.43) | | | | | 1000 kPa (179.91) | | | |
| 700 | 0.56007 | 3476.22 | 3924.27 | 8.3770 | 0.44779 | 3475.35 | 3923.14 | 8.2731 |
| 800 | 0.61813 | 3661.14 | 4155.65 | 8.6033 | 0.49432 | 3660.46 | 4154.78 | 8.4996 |
| 900 | 0.67610 | 3852.77 | 4393.65 | 8.8153 | 0.54075 | 3852.19 | 4392.94 | 8.7118 |
| 1000 | 0.73401 | 4051.00 | 4638.20 | 9.0153 | 0.58712 | 4050.49 | 4637.60 | 8.9119 |
| 1100 | 0.79188 | 4255.57 | 4889.08 | 9.2049 | 0.63345 | 4255.09 | 4888.55 | 9.1016 |
| 1200 | 0.84974 | 4466.05 | 5145.85 | 9.3854 | 0.67977 | 4465.58 | 5145.36 | 9.2821 |
| 1300 | 0.90758 | 4681.81 | 5407.87 | 9.5575 | 0.72608 | 4681.33 | 5407.41 | 9.4542 |
| 1200 kPa (187.99) | | | | | 1400 kPa (195.07) | | | |
| Sat. | 0.16333 | 2588.82 | 2784.82 | 6.5233 | 0.14084 | 2592.83 | 2790.00 | 6.4692 |
| 200 | 0.16930 | 2612.74 | 2815.90 | 6.5898 | 0.14302 | 2603.09 | 2803.32 | 6.4975 |
| 250 | 0.19235 | 2704.20 | 2935.01 | 6.8293 | 0.16350 | 2698.32 | 2927.22 | 6.7467 |
| 300 | 0.21382 | 2789.22 | 3045.80 | 7.0316 | 0.18228 | 2785.16 | 3040.35 | 6.9533 |
| 350 | 0.23452 | 2872.16 | 3153.59 | 7.2120 | 0.20026 | 2869.12 | 3149.49 | 7.1359 |
| 400 | 0.25480 | 2954.90 | 3260.66 | 7.3773 | 0.21780 | 2952.50 | 3257.42 | 7.3025 |
| 500 | 0.29463 | 3122.72 | 3476.28 | 7.6758 | 0.25215 | 3121.10 | 3474.11 | 7.6026 |
| 600 | 0.33393 | 3295.60 | 3696.32 | 7.9434 | 0.28596 | 3294.44 | 3694.78 | 7.8710 |
| 700 | 0.37294 | 3474.48 | 3922.01 | 8.1881 | 0.31947 | 3473.61 | 3920.87 | 8.1160 |
| 800 | 0.41177 | 3659.77 | 4153.90 | 8.4149 | 0.35281 | 3659.09 | 4153.03 | 8.3431 |
| 900 | 0.45051 | 3851.62 | 4392.23 | 8.6272 | 0.38606 | 3851.05 | 4391.53 | 8.5555 |
| 1000 | 0.48919 | 4049.98 | 4637.00 | 8.8274 | 0.41924 | 4049.47 | 4636.41 | 8.7558 |
| 1100 | 0.52783 | 4254.61 | 4888.02 | 9.0171 | 0.45239 | 4254.14 | 4887.49 | 8.9456 |
| 1200 | 0.56646 | 4465.12 | 5144.87 | 9.1977 | 0.48552 | 4464.65 | 5144.38 | 9.1262 |
| 1300 | 0.60507 | 4680.86 | 5406.95 | 9.3698 | 0.51864 | 4680.39 | 5406.49 | 9.2983 |
| 1600 kPa (201.40) | | | | | 1800 kPa (207.15) | | | |
| Sat. | 0.12380 | 2595.95 | 2794.02 | 6.4217 | 0.11042 | 2598.38 | 2797.13 | 6.3793 |
| 250 | 0.14184 | 2692.26 | 2919.20 | 6.6732 | 0.12497 | 2686.02 | 2910.96 | 6.6066 |
| 300 | 0.15862 | 2781.03 | 3034.83 | 6.8844 | 0.14021 | 2776.83 | 3029.21 | 6.8226 |
| 350 | 0.17456 | 2866.05 | 3145.35 | 7.0693 | 0.15457 | 2862.95 | 3141.18 | 7.0099 |
| 400 | 0.19005 | 2950.09 | 3254.17 | 7.2373 | 0.16847 | 2947.66 | 3250.90 | 7.1793 |
| 500 | 0.22029 | 3119.47 | 3471.93 | 7.5389 | 0.19550 | 3117.84 | 3469.75 | 7.4824 |
| 600 | 0.24998 | 3293.27 | 3693.23 | 7.8080 | 0.22199 | 3292.10 | 3691.69 | 7.7523 |
| 700 | 0.27937 | 3472.74 | 3919.73 | 8.0535 | 0.24818 | 3471.87 | 3918.59 | 7.9983 |
| 800 | 0.30859 | 3658.40 | 4152.15 | 8.2808 | 0.27420 | 3657.71 | 4151.27 | 8.2258 |
| 900 | 0.33772 | 3850.47 | 4390.82 | 8.4934 | 0.30012 | 3849.90 | 4390.11 | 8.4386 |
| 1000 | 0.36678 | 4048.96 | 4635.81 | 8.6938 | 0.32598 | 4048.45 | 4635.21 | 8.6390 |
| 1100 | 0.39581 | 4253.66 | 4886.95 | 8.8837 | 0.35180 | 4253.18 | 4886.42 | 8.8290 |
| 1200 | 0.42482 | 4464.18 | 5143.89 | 9.0642 | 0.37761 | 4463.71 | 5143.40 | 9.0096 |
| 1300 | 0.45382 | 4679.92 | 5406.02 | 9.2364 | 0.40340 | 4679.44 | 5405.56 | 9.1817 |

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 2000 kPa (212.42) | | | | | 2500 kPa (223.99) | | | |
| Sat. | 0.09963 | 2600.26 | 2799.51 | 6.3408 | 0.07998 | 2603.13 | 2803.07 | 6.2574 |
| 250 | 0.11144 | 2679.58 | 2902.46 | 6.5452 | 0.08700 | 2662.55 | 2880.06 | 6.4084 |
| 300 | 0.12547 | 2772.56 | 3023.50 | 6.7663 | 0.09890 | 2761.56 | 3008.81 | 6.6437 |
| 350 | 0.13857 | 2859.81 | 3136.96 | 6.9562 | 0.10976 | 2851.84 | 3126.24 | 6.8402 |
| 400 | 0.15120 | 2045.21 | 3247.60 | 7.1270 | 0.12010 | 2939.03 | 3239.28 | 7.0147 |
| 450 | 0.16353 | 3030.41 | 3357.48 | 7.2844 | 0.13014 | 3025.43 | 3350.77 | 7.1745 |
| 500 | 0.17568 | 3116.20 | 3467.55 | 7.4316 | 0.13998 | 3112.08 | 3462.04 | 7.3233 |
| 600 | 0.19960 | 3290.93 | 3690.14 | 7.7023 | 0.15930 | 3287.99 | 3686.25 | 7.5960 |
| 700 | 0.22323 | 3470.99 | 3917.45 | 7.9487 | 0.17832 | 3468.80 | 3914.59 | 7.8435 |
| 800 | 0.24668 | 3657.03 | 4150.40 | 8.1766 | 0.19716 | 3655.30 | 4148.20 | 8.0720 |
| 900 | 0.27004 | 3849.33 | 4389.40 | 8.3895 | 0.21590 | 3847.89 | 4387.64 | 8.2853 |
| 1000 | 0.29333 | 4047.94 | 4634.61 | 8.5900 | 0.23458 | 4046.67 | 4633.12 | 8.4860 |
| 1100 | 0.31659 | 4252.71 | 4885.89 | 8.7800 | 0.25322 | 4251.52 | 4884.57 | 8.6761 |
| 1200 | 0.33984 | 4463.25 | 5142.92 | 8.9606 | 0.27185 | 4462.08 | 5141.70 | 8.8569 |
| 1300 | 0.36306 | 4678.97 | 5405.10 | 9.1328 | 0.29046 | 4677.80 | 5403.95 | 9.0291 |
| 3000 kPa (233.90) | | | | | 4000 kPa (250.40) | | | |
| Sat. | 0.06668 | 2604.10 | 2804.14 | 6.1869 | 0.04978 | 2602.27 | 2801.38 | 6.0700 |
| 250 | 0.07058 | 2644.00 | 2855.75 | 6.2871 | — | — | — | — |
| 300 | 0.08114 | 2750.05 | 2993.48 | 6.5389 | 0.05884 | 2725.33 | 2960.68 | 6.3614 |
| 350 | 0.09053 | 2843.66 | 3115.25 | 6.7427 | 0.06645 | 2826.65 | 3092.43 | 6.5820 |
| 400 | 0.09936 | 2932.75 | 3230.82 | 6.9211 | 0.07341 | 2919.88 | 3213.51 | 6.7689 |
| 450 | 0.10787 | 3020.38 | 3344.00 | 7.0833 | 0.08003 | 3010.13 | 3330.23 | 6.9362 |
| 500 | 0.11619 | 3107.92 | 3456.48 | 7.2337 | 0.08643 | 3099.49 | 3445.21 | 7.0900 |
| 600 | 0.13243 | 3285.03 | 3682.34 | 7.5084 | 0.09885 | 3279.06 | 3674.44 | 7.3688 |
| 700 | 0.14838 | 3466.59 | 3911.72 | 7.7571 | 0.11095 | 3462.15 | 3905.94 | 7.6198 |
| 800 | 0.16414 | 3653.58 | 4146.00 | 7.9862 | 0.12287 | 3650.11 | 4141.59 | 7.8502 |
| 900 | 0.17980 | 3846.46 | 4385.87 | 8.1999 | 0.13469 | 3843.59 | 4382.34 | 8.0647 |
| 1000 | 0.19541 | 4045.40 | 4631.63 | 8.4009 | 0.14645 | 4042.87 | 4628.65 | 8.2661 |
| 1100 | 0.21098 | 4250.33 | 4883.26 | 8.5911 | 0.15817 | 4247.96 | 4880.63 | 8.4566 |
| 1200 | 0.22652 | 4460.92 | 5140.49 | 8.7719 | 0.16987 | 4458.60 | 5138.07 | 8.6376 |
| 1300 | 0.24206 | 4676.63 | 5402.81 | 8.9442 | 0.18156 | 4674.29 | 5400.52 | 8.8099 |

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 5000 kPa (263.99) | | | | | 6000 kPa (275.64) | | | |
| Sat. | 0.03944 | 2597.12 | 2794.33 | 5.9733 | 0.03244 | 2589.69 | 2784.33 | 5.8891 |
| 300 | 0.04532 | 2697.94 | 2924.53 | 6.2083 | 0.03616 | 2667.22 | 2884.19 | 6.0673 |
| 350 | 0.05194 | 2808.67 | 3068.39 | 6.4492 | 0.04223 | 2789.61 | 3042.97 | 6.3334 |
| 400 | 0.05781 | 2906.58 | 3195.64 | 6.6458 | 0.04739 | 2892.81 | 3177.17 | 6.5407 |
| 450 | 0.06330 | 2999.64 | 3316.15 | 6.8185 | 0.05214 | 2988.90 | 3301.76 | 6.7192 |
| 500 | 0.06857 | 3090.92 | 3433.76 | 6.9758 | 0.05665 | 3082.20 | 3422.12 | 6.8802 |
| 550 | 0.07368 | 3181.82 | 3550.23 | 7.1217 | 0.06101 | 3174.57 | 3540.62 | 7.0287 |
| 600 | 0.07869 | 3273.01 | 3666.47 | 7.2588 | 0.06525 | 3266.89 | 3658.40 | 7.1676 |
| 700 | 0.08849 | 3457.67 | 3900.13 | 7.5122 | 0.07352 | 3453.15 | 3894.28 | 7.4234 |
| 800 | 0.09811 | 3646.62 | 4137.17 | 7.7440 | 0.08160 | 3643.12 | 4132.74 | 7.6566 |
| 900 | 0.10762 | 3840.71 | 4378.82 | 7.9593 | 0.08958 | 3837.84 | 4375.29 | 7.8727 |
| 1000 | 0.11707 | 4040.35 | 4625.69 | 8.1612 | 0.09749 | 4037.83 | 4622.74 | 8.0751 |
| 1100 | 0.12648 | 4245.61 | 4878.02 | 8.3519 | 0.10536 | 4243.26 | 4875.42 | 8.2661 |
| 1200 | 0.13587 | 4456.30 | 5135.67 | 8.5330 | 0.11321 | 4454.00 | 5133.28 | 8.4473 |
| 1300 | 0.14526 | 4671.96 | 5398.24 | 8.7055 | 0.12106 | 4669.64 | 5395.97 | 8.6199 |
| 8000 kPa (295.06) | | | | | 10000 kPa (311.06) | | | |
| Sat. | 0.02352 | 2569.79 | 2757.94 | 5.7431 | 0.01803 | 2544.41 | 2724.67 | 5.6140 |
| 300 | 0.02426 | 2590.93 | 2784.98 | 5.7905 | — | — | — | — |
| 350 | 0.02995 | 2747.67 | 2987.30 | 6.1300 | 0.02242 | 2699.16 | 2923.39 | 5.9442 |
| 400 | 0.03432 | 2863.75 | 3138.28 | 6.3633 | 0.02641 | 2832.38 | 3096.46 | 6.2119 |
| 450 | 0.03817 | 2966.66 | 3271.99 | 6.5550 | 0.02975 | 2943.32 | 3240.83 | 6.4189 |
| 500 | 0.04175 | 3064.30 | 3398.27 | 6.7239 | 0.03279 | 3045.77 | 3373.63 | 6.5965 |
| 550 | 0.04516 | 3159.76 | 3521.01 | 6.8778 | 0.03564 | 3144.54 | 3500.92 | 6.7561 |
| 600 | 0.04845 | 3254.43 | 3642.03 | 7.0205 | 0.03837 | 3241.68 | 3625.34 | 6.9028 |
| 700 | 0.05481 | 3444.00 | 3882.47 | 7.2812 | 0.04358 | 3434.72 | 3870.52 | 7.1687 |
| 800 | 0.06097 | 3636.08 | 4123.84 | 7.5173 | 0.04859 | 3628.97 | 4114.91 | 7.4077 |
| 900 | 0.06702 | 3832.08 | 4368.26 | 7.7350 | 0.05349 | 3826.32 | 4361.24 | 7.6272 |
| 1000 | 0.07301 | 4032.81 | 4616.87 | 7.9384 | 0.05832 | 4027.81 | 4611.04 | 7.8315 |
| 1100 | 0.07896 | 4238.60 | 4870.25 | 8.1299 | 0.06312 | 4233.97 | 4865.14 | 8.0236 |
| 1200 | 0.08489 | 4449.45 | 5128.54 | 8.3115 | 0.06789 | 4444.93 | 5123.84 | 8.2054 |
| 1300 | 0.09080 | 4665.02 | 5391.46 | 8.4842 | 0.07265 | 4660.44 | 5386.99 | 8.3783 |

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg·K) |
|--------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 15000 kPa (342.24) | | | | | 20000 kPa (365.81) | | | |
| Sat. | 0.01034 | 2455.43 | 2610.49 | 5.3097 | 0.00583 | 2293.05 | 2409.74 | 4.9269 |
| 350 | 0.01147 | 2520.36 | 2692.41 | 5.4420 | — | — | — | — |
| 400 | 0.01565 | 2740.70 | 2975.44 | 5.8810 | 0.00994 | 2619.22 | 2818.07 | 5.5539 |
| 450 | 0.01845 | 2879.47 | 3156.15 | 6.1403 | 0.01270 | 2806.16 | 3060.06 | 5.9016 |
| 500 | 0.02080 | 2996.52 | 3308.53 | 6.3442 | 0.01477 | 2942.82 | 3238.18 | 6.1400 |
| 550 | 0.02293 | 3104.71 | 3448.61 | 6.5198 | 0.01656 | 3062.34 | 3393.45 | 6.3347 |
| 600 | 0.02491 | 3208.64 | 3582.30 | 6.6775 | 0.01818 | 3174.00 | 3537.57 | 6.5048 |
| 650 | 0.02680 | 3310.37 | 3712.32 | 6.8223 | 0.01969 | 3281.46 | 3675.32 | 6.6582 |
| 700 | 0.02861 | 3410.94 | 3840.12 | 6.9572 | 0.02113 | 3386.46 | 3809.09 | 6.7993 |
| 800 | 0.03210 | 3610.99 | 4092.43 | 7.2040 | 0.02385 | 3592.73 | 4069.80 | 7.0544 |
| 900 | 0.03546 | 3811.89 | 4343.75 | 7.4279 | 0.02645 | 3797.44 | 4326.37 | 7.2830 |
| 1000 | 0.03875 | 4015.41 | 4596.63 | 7.6347 | 0.02897 | 4003.12 | 4582.45 | 7.4925 |
| 1100 | 0.04200 | 4222.55 | 4852.56 | 7.8282 | 0.03145 | 4211.30 | 4840.24 | 7.6874 |
| 1200 | 0.04523 | 4433.78 | 5112.27 | 8.0108 | 0.03391 | 4422.81 | 5100.96 | 7.8706 |
| 1300 | 0.04845 | 4649.12 | 5375.94 | 8.1839 | 0.03636 | 4637.95 | 5365.10 | 8.0441 |
| 30000 kPa | | | | | 40000 kPa | | | |
| 375 | 0.001789 | 1737.75 | 1791.43 | 3.9303 | 0.001641 | 1677.09 | 1742.71 | 3.8289 |
| 400 | 0.002790 | 2067.34 | 2151.04 | 4.4728 | 0.001908 | 1854.52 | 1930.83 | 4.1134 |
| 425 | 0.005304 | 2455.06 | 2614.17 | 5.1503 | 0.002532 | 2096.83 | 2198.11 | 4.5028 |
| 450 | 0.006735 | 2619.30 | 2821.35 | 5.4423 | 0.003693 | 2365.07 | 2512.79 | 4.9459 |
| 500 | 0.008679 | 2820.67 | 3081.03 | 5.7904 | 0.005623 | 2678.36 | 2903.26 | 5.4699 |
| 550 | 0.010168 | 2970.31 | 3275.36 | 6.0342 | 0.006984 | 2869.69 | 3149.05 | 5.7784 |
| 600 | 0.011446 | 3100.53 | 3443.91 | 6.2330 | 0.008094 | 3022.61 | 3346.38 | 6.0113 |
| 650 | 0.012596 | 3221.04 | 3598.93 | 6.4057 | 0.009064 | 3158.04 | 3520.58 | 6.2054 |
| 700 | 0.013661 | 3335.84 | 3745.67 | 6.5606 | 0.009942 | 3283.63 | 3681.29 | 6.3750 |
| 800 | 0.015623 | 3555.60 | 4024.31 | 6.8332 | 0.011523 | 3517.89 | 3978.80 | 6.6662 |
| 900 | 0.017448 | 3768.48 | 4291.93 | 7.0717 | 0.012963 | 3739.42 | 4257.93 | 6.9150 |
| 1000 | 0.019196 | 3978.79 | 4554.68 | 7.2867 | 0.014324 | 3954.64 | 4527.59 | 7.1356 |
| 1100 | 0.020903 | 4189.18 | 4816.28 | 7.4845 | 0.015643 | 4167.38 | 4793.08 | 7.3364 |
| 1200 | 0.022589 | 4401.29 | 5078.97 | 7.6691 | 0.016940 | 4380.11 | 5057.72 | 7.5224 |
| 1300 | 0.024266 | 4615.96 | 5343.95 | 7.8432 | 0.018229 | 4594.28 | 5323.45 | 7.6969 |

TABLE B.1.4
Compressed Liquid Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 500 kPa (151.86) | | | | | 2000 kPa (212.42) | | | |
| Sat. | 0.001093 | 639.66 | 640.21 | 1.8606 | 0.001177 | 906.42 | 908.77 | 2.4473 |
| 0.01 | 0.000999 | 0.01 | 0.51 | 0.0000 | 0.000999 | 0.03 | 2.03 | 0.0001 |
| 20 | 0.001002 | 83.91 | 84.41 | 0.2965 | 0.001001 | 83.82 | 85.82 | .2962 |
| 40 | 0.001008 | 167.47 | 167.98 | 0.5722 | 0.001007 | 167.29 | 169.30 | .5716 |
| 60 | 0.001017 | 251.00 | 251.51 | 0.8308 | 0.001016 | 250.73 | 252.77 | .8300 |
| 80 | 0.001029 | 334.73 | 335.24 | 1.0749 | 0.001028 | 334.38 | 336.44 | 1.0739 |
| 100 | 0.001043 | 418.80 | 419.32 | 1.3065 | 0.001043 | 418.36 | 420.45 | 1.3053 |
| 120 | 0.001060 | 503.37 | 503.90 | 1.5273 | 0.001059 | 502.84 | 504.96 | 1.5259 |
| 140 | 0.001080 | 588.66 | 589.20 | 1.7389 | 0.001079 | 588.02 | 590.18 | 1.7373 |
| 160 | — | — | — | — | 0.001101 | 674.14 | 676.34 | 1.9410 |
| 180 | — | — | — | — | 0.001127 | 761.46 | 763.71 | 2.1382 |
| 200 | — | — | — | — | 0.001156 | 850.30 | 852.61 | 2.3301 |
| 5000 kPa (263.99) | | | | | 10000 kPa (311.06) | | | |
| Sat | 0.001286 | 1147.78 | 1154.21 | 2.9201 | 0.001452 | 1393.00 | 1407.53 | 3.3595 |
| 0 | 0.000998 | 0.03 | 5.02 | 0.0001 | 0.000995 | 0.10 | 10.05 | 0.0003 |
| 20 | 0.001000 | 83.64 | 88.64 | 0.2955 | 0.000997 | 83.35 | 93.32 | 0.2945 |
| 40 | 0.001006 | 166.93 | 171.95 | 0.5705 | 0.001003 | 166.33 | 176.36 | 0.5685 |
| 60 | 0.001015 | 250.21 | 255.28 | 0.8284 | 0.001013 | 249.34 | 259.47 | 0.8258 |
| 80 | 0.001027 | 333.69 | 338.83 | 1.0719 | 0.001025 | 332.56 | 342.81 | 1.0687 |
| 100 | 0.001041 | 417.50 | 422.71 | 1.3030 | 0.001039 | 416.09 | 426.48 | 1.2992 |
| 120 | 0.001058 | 501.79 | 507.07 | 1.5232 | 0.001055 | 500.07 | 510.61 | 1.5188 |
| 140 | 0.001077 | 586.74 | 592.13 | 1.7342 | 0.001074 | 584.67 | 595.40 | 1.7291 |
| 160 | 0.001099 | 672.61 | 678.10 | 1.9374 | 0.001195 | 670.11 | 681.07 | 1.9316 |
| 180 | 0.001124 | 759.62 | 765.24 | 2.1341 | 0.001120 | 756.63 | 767.83 | 2.1274 |
| 200 | 0.001153 | 848.08 | 853.85 | 2.3254 | 0.001148 | 844.49 | 855.97 | 2.3178 |
| 220 | 0.001187 | 938.43 | 944.36 | 2.5128 | 0.001181 | 934.07 | 945.88 | 2.5038 |
| 240 | 0.001226 | 1031.34 | 1037.47 | 2.6978 | 0.001219 | 1025.94 | 1038.13 | 2.6872 |
| 260 | 0.001275 | 1127.92 | 1134.30 | 2.8829 | 0.001265 | 1121.03 | 1133.68 | 2.8698 |
| 280 | — | — | — | — | 0.001322 | 1220.90 | 1234.11 | 3.0547 |
| 300 | — | — | — | — | 0.001397 | 1328.34 | 1342.31 | 3.2468 |

TABLE B.1.4 (continued)
Compressed Liquid Water

| Temp. (°C) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg-K) |
|--------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| 15000 kPa (342.24) | | | | | 20000 kPa (365.81) | | | |
| Sat. | 0.001658 | 1585.58 | 1610.45 | 3.6847 | 0.002035 | 1785.47 | 1826.18 | 4.0137 |
| 0 | 0.000993 | 0.15 | 15.04 | 0.0004 | 0.000990 | 0.20 | 20.00 | 0.0004 |
| 20 | 0.000995 | 83.05 | 97.97 | 0.2934 | 0.000993 | 82.75 | 102.61 | 0.2922 |
| 40 | 0.001001 | 165.73 | 180.75 | 0.5665 | 0.000999 | 165.15 | 185.14 | 0.5646 |
| 60 | 0.001011 | 248.49 | 263.65 | 0.8231 | 0.001008 | 247.66 | 267.82 | 0.8205 |
| 80 | 0.001022 | 331.46 | 346.79 | 1.0655 | 0.001020 | 330.38 | 350.78 | 1.0623 |
| 100 | 0.001036 | 414.72 | 430.26 | 1.2954 | 0.001034 | 413.37 | 434.04 | 1.2917 |
| 120 | 0.001052 | 498.39 | 514.17 | 1.5144 | 0.001050 | 496.75 | 517.74 | 1.5101 |
| 140 | 0.001071 | 582.64 | 598.70 | 1.7241 | 0.001068 | 580.67 | 602.03 | 1.7192 |
| 160 | 0.001092 | 667.69 | 684.07 | 1.9259 | 0.001089 | 665.34 | 687.11 | 1.9203 |
| 180 | 0.001116 | 753.74 | 770.48 | 2.1209 | 0.001112 | 750.94 | 773.18 | 2.1146 |
| 200 | 0.001143 | 841.04 | 858.18 | 2.3103 | 0.001139 | 837.70 | 860.47 | 2.3031 |
| 220 | 0.001175 | 929.89 | 947.52 | 2.4952 | 0.001169 | 925.89 | 949.27 | 2.4869 |
| 240 | 0.001211 | 1020.82 | 1038.99 | 2.6770 | 0.001205 | 1015.94 | 1040.04 | 2.6673 |
| 260 | 0.001255 | 1114.59 | 1133.41 | 2.8575 | 0.001246 | 1108.53 | 1133.45 | 2.8459 |
| 280 | 0.001308 | 1212.47 | 1232.09 | 3.0392 | 0.001297 | 1204.69 | 1230.62 | 3.0248 |
| 300 | 0.001377 | 1316.58 | 1337.23 | 3.2259 | 0.001360 | 1306.10 | 1333.29 | 3.2071 |
| 320 | 0.001472 | 1431.05 | 1453.13 | 3.4246 | 0.001444 | 1415.66 | 1444.53 | 3.3978 |
| 340 | 0.001631 | 1567.42 | 1591.88 | 3.6545 | 0.001568 | 1539.64 | 1571.01 | 3.6074 |
| 360 | | | | | 0.001823 | 1702.78 | 1739.23 | 3.8770 |
| 30000 kPa | | | | | 50000 kPa | | | |
| 0 | 0.000986 | 0.25 | 29.82 | 0.0001 | 0.000977 | 0.20 | 49.03 | -0.0014 |
| 20 | 0.000989 | 82.16 | 111.82 | 0.2898 | 0.000980 | 80.98 | 130.00 | 0.2847 |
| 40 | 0.000995 | 164.01 | 193.87 | 0.5606 | 0.000987 | 161.84 | 211.20 | 0.5526 |
| 60 | 0.001004 | 246.03 | 276.16 | 0.8153 | 0.000996 | 242.96 | 292.77 | 0.8051 |
| 80 | 0.001016 | 328.28 | 358.75 | 1.0561 | 0.001007 | 324.32 | 374.68 | 1.0439 |
| 100 | 0.001029 | 410.76 | 441.63 | 1.2844 | 0.001020 | 405.86 | 456.87 | 1.2703 |
| 120 | 0.001044 | 493.58 | 524.91 | 1.5017 | 0.001035 | 487.63 | 539.37 | 1.4857 |
| 140 | 0.001062 | 576.86 | 608.73 | 1.7097 | 0.001052 | 569.76 | 622.33 | 1.6915 |
| 160 | 0.001082 | 660.81 | 693.27 | 1.9095 | 0.001070 | 652.39 | 705.91 | 1.8890 |
| 180 | 0.001105 | 745.57 | 778.71 | 2.1024 | 0.001091 | 735.68 | 790.24 | 2.0793 |
| 200 | 0.001130 | 831.34 | 865.24 | 2.2892 | 0.001115 | 819.73 | 875.46 | 2.2634 |
| 220 | 0.001159 | 918.32 | 953.09 | 2.4710 | 0.001141 | 904.67 | 961.71 | 2.4419 |
| 240 | 0.001192 | 1006.84 | 1042.60 | 2.6489 | 0.001170 | 990.69 | 1049.20 | 2.6158 |
| 260 | 0.001230 | 1097.38 | 1134.29 | 2.8242 | 0.001203 | 1078.06 | 1138.23 | 2.7860 |
| 280 | 0.001275 | 1190.69 | 1228.96 | 2.9985 | 0.001242 | 1167.19 | 1229.26 | 2.9536 |
| 300 | 0.001330 | 1287.89 | 1327.80 | 3.1740 | 0.001286 | 1258.66 | 1322.95 | 3.1200 |
| 320 | 0.001400 | 1390.64 | 1432.63 | 3.3538 | 0.001339 | 1353.23 | 1420.17 | 3.2867 |
| 340 | 0.001492 | 1501.71 | 1546.47 | 3.5425 | 0.001403 | 1451.91 | 1522.07 | 3.4556 |
| 360 | 0.001627 | 1626.57 | 1675.36 | 3.7492 | 0.001484 | 1555.97 | 1630.16 | 3.6290 |
| 380 | 0.001869 | 1781.35 | 1837.43 | 4.0010 | 0.001588 | 1667.13 | 1746.54 | 3.8100 |